

# 临近地铁隧道加固施工非原位试验分析研究

张程

(上海汇谷岩土工程技术有限公司, 上海 201108)

**【摘要】** 上海地铁 2 号线某地铁上盖项目采用三轴搅拌桩对地铁隧道周围土体进行加固, 为测试施工工法对地铁隧道结构的影响, 进而优化设计施工参数, 施工前进行了非原位试验研究。试验中对三轴搅拌桩施工过程中距桩墙中心 1.5~3.0 m 范围内的深层土体侧向位移进行了测试。试验结果表明: 在三轴搅拌下沉至设计深度时, 周边土体变形出现峰值, 成桩后 3 h 变形量值开始回落, 成桩后 64 h 变形基本稳定在 1~2 mm, 变形深度主要在浅部, 施工叠加影响会导致变形影响深度下移。试验结果可为同类工程提供参考。

**【关键词】** 地铁隧道; 非原位试验; 三轴搅拌桩; 土体变形; 优化参数

**【中图分类号】** TU 472

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.03.014

## Non-in Situ Test Analysis of Reinforcement Construction Near Subway Tunnel

Zhang Cheng

(Shanghai BV Geotechnical Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

**【Abstract】** Triaxial mixing pile was used to reinforce the soil around the subway tunnel of Shanghai Metro Line 2. In order to test the influence of construction method on subway tunnel structure and optimize the design of construction parameters, non-in situ test research was carried out before construction. During the construction of triaxial mixing pile, the lateral displacement of deep soil in the range of 1.5~3.0 m from the center of pile wall was tested. The test results show that when triaxial mixing sinks to the design depth, the deformation of surrounding soil reaches the peak value. The deformation value begins to fall 3 hours after pile completion, and the deformation was basically stable at 1~2 mm at 64 hours after pile completion. The deformation depth was mainly in the shallow part, and the superposition influence of construction would lead to the downward movement of the deformation influence depth. This research could provide reference for similar projects.

**【Key words】** subway tunnel; non-in situ test; triaxial mixing pile; soil deformation; optimization parameters

### 0 引言

在临近城市地铁隧道区域开展工程建设, 往往由于施工扰动隧道围岩土体导致隧道发生变形, 主要体现在隧道收敛、沉降、位移, 如果变形较大会影响轨道交通的运行安全<sup>[1-2]</sup>。

目前大多数城市在临近地铁隧道区域施工均会在保护区范围内采取土体加固措施, 加固方法多以 MJS、SMW 三轴搅拌为主。三轴搅拌加固是以三轴型钻掘搅拌机向一定深度进行钻掘, 同时在钻头处喷出水泥浆与地基土反复混合搅拌, 形成具有一定强度和刚度且连续完整的土体<sup>[3-6]</sup>, 但是三轴搅拌加固施工会对周围土体及邻近隧道结构产生一定的影响, 施

工过程中孔隙水压力明显增大, 土体抗剪强度减小, 周围土体存在一定程度上的变形<sup>[7-13]</sup>, 朱蕾<sup>[14]</sup>通过 SMW 工法桩施工期间相邻隧道的变形监测发现, 土体加固会导致相邻隧道结构产生隆起或沉降, 文新伦<sup>[15]</sup>通过紧邻地铁隧道的三轴搅拌桩施工原位试验发现, 搅拌桩施工过程中地铁隧道最大隆起量为 2.62 mm, 亦进行了非原位测试, 但测试时间跨度较小, 且主要采集隧道的变形, 未能反映出加固开始前到土体强度增长后土体的连续变形情况; 赵伟等<sup>[16]</sup>研究表明水泥搅拌桩施工的横向影响范围约 6 m, 最大位移发生在地表位置。

本文针对上海轨道交通 2 号线某地铁上盖项目

采用三轴搅拌加固隧道围岩,进行了工前非原位测试,结合场地实际情况对地铁隧道周边土体变形进行分析研究,以期获得更为完整的测试数据,为临近地铁隧道土体加固工程提供参考。

## 1 工程背景

某综合发展项目位于上海市静安区,该项目地块被吴江路分为南北两区,其中北区地块范围内有2号线地铁运营隧道从场地东西方向穿越,区间隧道直径为6.2 m,管片壁厚度350 mm,隧道顶埋深约9.0 m。

北区地块基坑面积约3810 m<sup>2</sup>,开挖深度3.95~4.55 m,坑底距离隧道顶约4.45 m,位于基坑正下方的地铁隧道区间长度约为102 m。采用 $\phi 850$ 三轴搅拌桩对隧道周围土体进行加固,加固区域为地铁隧道正上方及两侧,隧道正上方加固深度7.5 m,隧道两侧加固深度17.8 m,加固区为“门”式加固(见图1)。

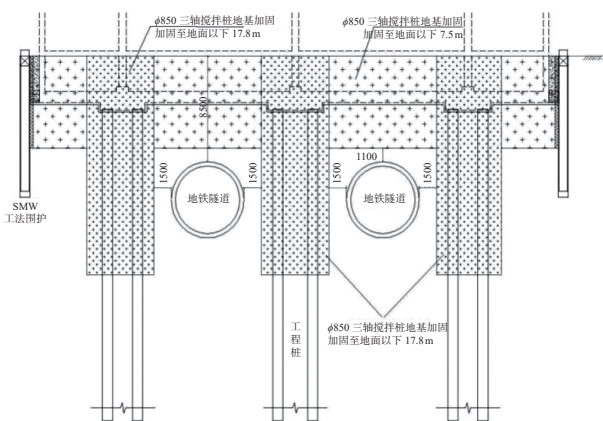


图1 地铁隧道与加固区域剖面关系(单位:mm)

为了降低三轴搅拌加固施工对地铁隧道的影响,在正式施工前,于北区地块内进行了非原位试验。试验区地质情况与拟加固区相同,通过试验优化并确定施工参数,减小三轴搅拌施工对周围土体的影响,以达到在正式施工中减小对地铁隧道的影响,满足对地铁隧道的保护要求,降低施工风险。

## 2 试验设计及过程

### 2.1 试验设计

垂直于三轴搅拌桩走向,在距离每根试桩中心1.5 m、3.0 m位置处设置土体测斜管,测点数量为6孔,测孔深度30 m(最深加固深度17.8 m),以孔底为测试基准,辅以孔口修正,试验测点布置见图2。

试验控制值为变形量不超过2 mm,以满足地铁隧道变形控制要求。试桩施工顺序为SZ1和SZ3(第一次)—SZ2(第二次),两次施工间隔三天。第一次施工试桩SZ1和SZ3,重点监测测点Z1、Z2、Z5、Z6;第二次施工试桩SZ2,重点监测测点Z3、Z4。在每根桩施工时,在不同的搅拌深度监测该桩对应测斜孔处的深层土体侧向变形。搅拌桩试桩施工参数见表1。

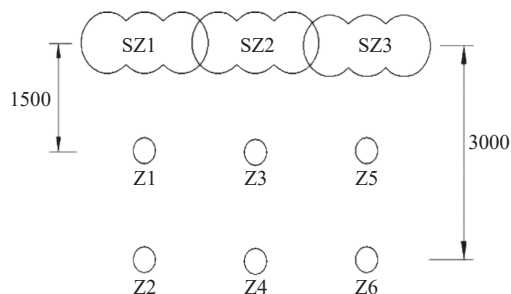


图2 试验搅拌桩与土体测斜孔位置关系(单位:mm)

表1 搅拌桩试桩施工参数

桩号	桩型	有效桩长度/m	下沉时间/min	提升时间/min	下沉速率/(m·min <sup>-1</sup> )	提升速度/(m·min <sup>-1</sup> )	泥浆比重	浆泵压力/MPa
SZ1	$\phi 850$	17.8	60	38	0.3	0.47	1.45~1.49	5~6
SZ3	$\phi 850$	17.8	60	40	0.3	0.45	1.45~1.49	5~6
SZ2	$\phi 850$	17.8	60	38	0.25	0.45	1.47~1.50	5~6

注:现场实际每次拌浆(按1.2水灰质量比),先放600 kg水,再放500 kg水泥,为一桶,共拌30桶,单桩水泥用量15 t。

土体测斜孔在开始试验前15天埋设,成孔孔径130 mm,为确保回填密实效果,采用1(水泥):2.5(水):5(膨润土)配置浆液置换护壁泥浆进行回填,后期上部孔隙采用膨润土球进行多次少量回填密实,在测试前3天,每天测试2次,判断测斜管埋设是否已稳定,稳定标准按变形速率不大于0.3 mm/d设定。

当测斜管稳定后,试验开始实施。在搅拌桩施工前2 h,连续测得两次数据并且数据达到稳定标准,

初读数取两次测量之平均值。

每根桩在施工期间测试3次,测试节点为:搅拌桩开始下沉时测1次,下沉至设计深度(17.8 m)时测1次,提升至地表时测1次;试桩完成后每天测2次,持续测试3天,共计试桩期间测试11次(不含稳定性测试)。

### 2.2 试验过程

第一阶段(测斜管稳定性测试):在测斜管埋设后7天,土体深层水平向位移一般为0.5~0.6 mm,

埋设后 12 天,土体深层水平向位移一般在 0.2 ~ 0.3 mm,判断土体测斜管已稳定。

第二阶段(施工阶段):

(1)施工试桩 SZ1 和 SZ3,重点测试 Z1、Z2、Z5、Z6

试桩开始施工时测试一组,搅拌下沉至设计深度后测试一组,提升至地表后测试一组对应测斜孔的土体深层变形数据;试桩施工时间持续约 4 h,施工完成后,分别于完成后 6 h、14 h 再次测试;试桩完成后每天测 2 次,持续测试 3 天。

(2)施工试桩 SZ2,重点测试 Z3、Z4

开始施工时测试一组,搅拌下沉至设计深度后测试一组,提升至地表后测试一组对应测斜孔的土体深层变形数据;试桩施工 98 min,施工完成后,分别于完成后 6 h、14 h 再次测试;试桩完成每天测后 2 次,持续测试 3 天。

### 3 试验分析

本次试验按照既定试验要求完成试验。在试验过程中,三轴搅拌施工机械组装,导致地面荷载增大,在此期间进行持续监测,浅部土体(最大影响深度约为 15 m 左右)水平向位移明显,变形峰值为 2.5 mm;重型施工机械拼装完成后 3 ~ 4 天,在管口以下 10.0 ~ 25.0 m 之间,土体水平向位移一般在 0.5 mm 以内,土体水平向位移基本得到控制,测斜监测数据重新达到稳定状态。

各测点施工过程中的变形峰值及最终变形最大值见表 2、表 3,代表性土体变形曲线见图 3。

表 2 施工过程中试验土体变形峰值统计

测点编号	峰值对应工况	变形峰值/mm	对应深度/m	备注
Z1	下沉至设计深度	4.00	1.5	第一次试桩
Z2	开始下沉约 3 m	1.16	1.0	
Z5	下沉至设计深度	7.47	14.0	
Z6	下沉至设计深度	4.37	12.5	
Z3	下沉至设计深度	4.38	3.0	第二次试桩
Z4	提升至地面	1.47	0.5	

表 3 试验土体最终变形最大值统计

测点编号	测试时间	最终变形最大值/mm	对应深度/m	备注
Z1	成桩后 64.5 h	1.99	0.5	第一次试桩
Z2		1.10	7.5	
Z5		1.57	0.5	
Z6		1.02	1.5	
Z3	成桩后 64.5 h	1.88	3.0	第二次试桩
Z4		1.61	0.5	

试验分析:

(1)根据测试结果,最终变形量满足地铁结构保护要求的变形量,达到部分试验目的。

(2)根据试验数据,在施工过程中对周边土体的影响较大,当三轴搅拌下沉至设计深度时,土体变形出现峰值,距离试桩中心 1.5 m 处土体的变形约为 3 m 处土体变形的 2 倍,第一次试验试桩施工顺序为 SZ1—SZ3,对应土体变形由于施工影响叠加,Z5、Z6 峰值变形数据明显大于 Z1、Z2,峰值变形深度下移至隧道底部,叠加影响变形量约为 Z1、Z2 变形量的 2 倍。

(3)变形峰值均出现在下沉至隧道底部,此阶段对地铁隧道存在较大影响,成桩 3 h 后,变形峰值开始回落,此时随着三轴搅拌桩施工喷浆压力的消失和水泥土逐步产生强度,周边土体的变形逐步回弹并最终稳定。

(4)本次试验地坪为原状土铺设钢板,在机械进场及拼装和拆除过程中,引起地面荷载变化,数据显示对周边土体的变形影响范围及影响程度较大(最大影响深度约 14 m,引起的最大变形峰值约 4.0 mm),在后续施工中,应铺设钢筋混凝土地面降低因大型机械走行或材料堆放引起的集中荷载对周边土体的影响。

(5)成桩后 64.5 h,周围土体变形已基本稳定,最大变形数据均在 1 ~ 2 mm,距离试桩中心 1.5 m 和 3 m 处土体变形大部分集中在浅部,少部分存在于中部。

### 4 结论

根据前述地铁隧道深层搅拌加固工前试验研究,得出以下结论:

(1)三轴搅拌施工扰动下,周边土体侧向位移的变形呈现“近大远小、浅大深小”的趋势,本次试验中水平距离 1.5 m 和 3 m 处土体侧向位移差约为 2 倍关系,最终变形最大值大部分集中在浅部 3 m 以内。

(2)在加固影响范围内土体侧向位移变形会受到施工叠加影响,在水平方向上出现变形峰值增大,影响深度下移趋势。

(3)成桩 3 h 后,随着加固土体强度的增长及喷浆压力的消散,土体侧向位移开始逐步回弹,64.5 h 后回弹至最大变形峰值的 43% ~ 50%,最终变形满足地铁隧道保护要求。

(4)三轴搅拌机施工荷载对加固场地土体侧向位移影响较大,本次试验中影响深度约 14 m,建议正式施工时对场地进行硬化处理。

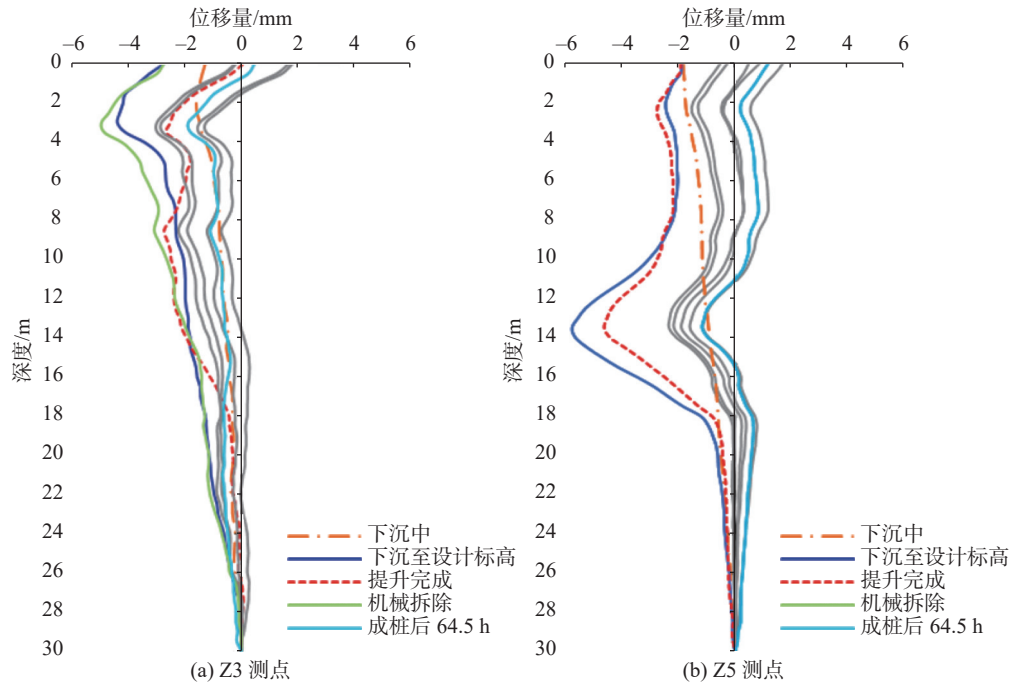


图3 代表性土体变形曲线

## 参 考 文 献

- [1] 刘纯洁. 地铁车站深基坑位移全过程控制与基坑邻近隧道保护[D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [2] 况龙川. 深基坑施工对地铁隧道的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 284-288.
- [3] 王 煜. SMW工法三轴搅拌对周围土体的影响分析[J]. 建筑施工, 2013, 35(5): 363-365.
- [4] 李兴国, 高 亮, 王 凯, 等. MJS工法在紧邻地铁工程中的应用[J]. 地基基础, 2016, 38(2): 131-132.
- [5] 温锁林. 运营地铁隧道上方基坑施工技术及其保护措施[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(S1): 1465-1469.
- [6] 陈 方. 深基坑近距离上跨运营轨道交通区间隧道的技术措施研究[J]. 中国市政工程, 2021, (2): 84-87.
- [7] 周惠涛. 超深三轴搅拌桩作基坑槽壁加固对紧邻轨道交通的影响[J]. 上海建设科技, 2016, (4): 48-49.
- [8] 许四法, 周奇辉, 郑文豪, 等. 基坑施工对临近运营隧道变形影响全过程实测分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 804-812.
- [9] 王占生, 潘皇宋, 庄群虎, 等. 基坑围护SMW工法桩施工对下卧盾构隧道变形影响分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 53-56.
- [10] 张 凡, 温卫军, 张正洪. 地铁侧多排三轴搅拌桩施工技术[J]. 城市建筑, 2014, (8): 115-116.
- [11] 裴行凯, 倪小东. 临近隧道基坑开挖中土体加固的敏感性分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(2): 19-23.
- [12] 钟 铮, 梅英宝. 紧邻地铁的大型深基坑施工中的环境保护[J]. 建筑施工, 2006, 28(11): 863-865.
- [13] 曾 婕, 龚迪快, 成怡冲, 等. 软土地区深基坑变形控制措施对减小临近隧道变形的效果分析[J]. 工程勘察, 2018, (5): 14-21.
- [14] 朱 蕾. SMW工法水泥土搅拌桩施工期间相邻隧道的变形监测[J]. 铁道建筑, 2007, (2): 46-47.
- [15] 文新伦. 紧邻地铁隧道的三轴搅拌施工参数选择与应用[J]. 建筑施工, 2010, 32(4): 316-318.
- [16] 赵 伟, 杨龙才, 王炳龙, 等. 水泥土搅拌桩施工引起临近地层位移的监测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S2): 869-873.

收稿日期: 2021-03-10