

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.02.011

【工程应用】

# 三轴搅拌桩和 MJS 工法桩对运营地铁隧道的保护研究

蒋 恺<sup>1</sup>, 张陆新<sup>1</sup>, 姚基伟<sup>2</sup>

(1. 浙江交科交通科技有限公司, 浙江 杭州 310005; 2. 杭州交投建管项目管理有限公司, 浙江 杭州 310008)

**摘 要:** 京杭运河新开挖航道从运营的杭州地铁 1 号线正上方垂直穿过, 为了控制新航道基坑开挖造成的地铁隧道变形和破坏, 需对交叉范围采取保护措施。以核心保护区搅拌桩施工为例, 分别研究了传统的三轴搅拌桩和新型的 MJS 工法桩两种土体加固施工工艺。对比分析了两者的施工原理、工艺流程、成桩设备、成桩方式、成桩深度(桩径)、排泥(浆)方式和地内压力控制等内容, 对两者的优缺点进行了总结。同时, 结合实际施工案例, 通过分析两种工艺施工过程中运营地铁隧道水平位移值、拱顶沉降值、管片收敛值等监测监控数据, 综合对比了两者在保护运营地铁隧道安全方面的实际施工效果差异。结果表明, 在不考虑工程造价和经济性的情况下, MJS 工法桩要明显优于三轴搅拌桩。三轴搅拌桩和 MJS 工法桩对地铁隧道水平位移的控制效果较好, 对拱顶沉降和管片收敛的控制效果较差。MJS 工法桩会使地铁隧道的变形更加平缓, 每月的变形值能够控制在 1~2 mm 左右。

**关键词:** 三轴搅拌桩; MJS 工法桩; 施工工艺; 地铁保护; 沉降; 收敛; 变形

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)02-0170-08

## Study on effect of triaxial DCM and MJS method on protection subway tunnels in operation

JIANG Kai<sup>1</sup>, ZHANG Lu-xin<sup>1</sup>, YAO Ji-wei<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Jiaoke Transport Technology Co., Ltd., Hangzhou 310005, Zhejiang, China;

2. Hangzhou Jiaotou Construction Management Project Management Co., Ltd., Hangzhou 310008, Zhejiang, China)

**Abstract:** A newly excavated channel of the Beijing-Hangzhou canal will pass vertically above the operating Hangzhou Metro line 1. To control the deformation and destruction of metro tunnel caused by the excavation of new channel, protective measures should be taken. Two kinds of soil reinforcement construction technologies, the traditional triaxial deep cement mixing (DCM) method and the new metro jet system (MJS) construction method, are studied respectively. The construction principle, technological process, construction equipment, treatment depth and diameter, mud (slurry) discharge mode and underground earth pressure control of the two methods are compared and analyzed. The advantages and disadvantages of the two methods are summarized. At the same time, combined with the actual construction cases, through analyzing the monitoring data such as the horizontal displacements, vault settlements and segment convergence of the tunnels in the construction process, the actual construction effect differences in protecting the safety of the tunnels are compared. The results show that MJS method is superior to triaxial DCM without considering the cost. The control effect of triaxial DCM and MJS method on horizontal displacements of metro tunnels is good, but the control of settlements and segment convergence is poor. MJS method makes the deformation of subway tunnel gentler, and the monthly deformation can be controlled at about 1-2 mm.

**Key words:** triaxial DCM; MJS method; construction technology; metro protection; settlement; convergence; deformation

收稿日期: 2021-12-26

作者简介: 蒋恺(1991—), 男, 浙江湖州人, 本科, 工程师, 主要从事交通建设工程第三方施工安全技术咨询。E-mail: 806107121@qq.com。

# 0 引言

随着杭州城市建设速度的加快和轨道交通的普及, 紧邻既有运营地铁隧道施工的建设项来越来越多。为了控制施工过程中地铁隧道变形和破坏, 确保地铁运营安全, 往往需要先对交叉范围的土体采取固化措施, 从而减少后续其他施工产生的扰动<sup>[1]</sup>。搅拌桩土体加固是利用搅拌桩机将水泥浆喷入土体并充分搅拌, 使水泥浆与土发生一系列物理化学反应, 使软土硬结而提高土层强度。其中, 传统的三轴搅拌桩和近些年从日本引进的新型 MJS (Metro Jet System) 工法桩<sup>[2-3]</sup>, 是此类土体固化工程中运用较多的两种施工工艺。

根据现有研究, 在紧邻既有运营地铁隧道的土体固化施工中, 两种工艺单独实施时均有成功的案例<sup>[4-6]</sup>, 但在同一个工程项目中, 两种工艺的机理和施工效果的差异尚未见报道。京杭运河新开挖航道从运营的杭州地铁 1 号线正上方垂直穿过, 跨地铁保护范围先后采用了三轴搅拌桩和 MJS 工法桩两种土体固化施工工艺。通过详细对比分析, 得出两种施工工艺在保护运营地铁隧道安全方面的差异, 为以后类似工程的设计、施工和监管提供参考。

## 1 地铁保护概况

京杭运河浙江段三级航道整治工程杭州段(新开挖航段)从运营的杭州地铁 1 号线正上方垂直穿过, 新航道底面与地铁隧道顶面的最小距离仅 4.9 m, 航道基坑开挖对地铁隧道 1137~987 号管片有很大的影响。为控制航道基坑开挖过程中的地铁隧道变形和破坏, 确保地铁运营安全, 需对交叉范围采取专项保护措施。

新航道跨地铁 1 号线保护工程设计桩号为 K'36+490~K'36+643, 全长 153 m。其中 K'36+538~K'36+582 段从地铁 1 号线正上方穿过, 为核心保护区范围, K'36+490~K'36+538 段和 K'36+582~K'36+643 段为非核心保护区范围(见图 1)。核心保护区航道基坑平面尺度为 44 m×70 m, 基坑设计底标高-4.4 m, 原地面标高平均约+6.2 m, 基坑最大开挖深度约 10.6 m。基坑东西侧采用永临结合的直立式水泥土挡墙联合双排灌注桩方案, 南北两侧采用钻孔灌注桩+止水帷幕方案, 与东西闭合, 基坑中部设置 3 排立柱桩+格构柱。核心保护区主要施工内容包括了搅拌桩土体加固施工、钻孔灌注桩

施工(支挡桩、立柱桩、抗拔桩)、降排水施工和航道基坑开挖支护及底板施工等。

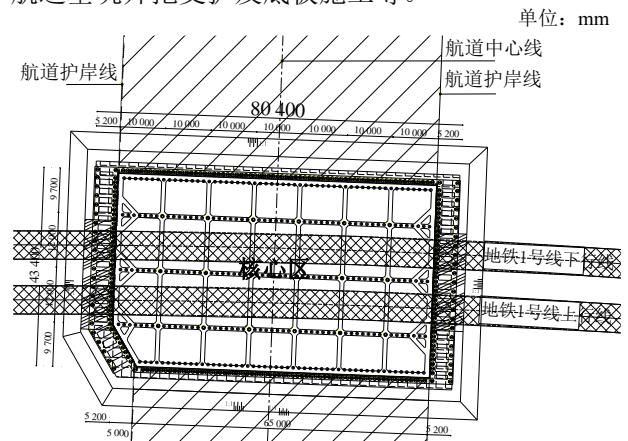


图 1 核心保护区基坑与杭州地铁 1 号线平面位置关系  
Fig. 1 Plane position relationship between foundation pit of protection area and Hangzhou Metro line 1

## 2 搅拌桩加固概况

由于航道基坑影响深度范围地层中大部分为粉砂土层, 含水量高, 强度及密实度离散性较大, 且局部存在液化的可能, 若前期土体加固不当, 在后期基坑开挖过程中极易发生流土、管涌和坑底隧道隆起等现象, 从而导致地铁隧道变形和破坏, 造成严重的后果。因此, 前期搅拌桩土体加固是极其重要的一个施工环节。核心保护区搅拌桩土体加固范围如表 1 所示。

其中, 位于地铁隧道正上方和两侧的搅拌桩桩体与隧道距离近(最小间隔不足 1.5 m, 见图 2), 施工周期长, 在施工过程中会不断扰动土体, 影响地铁隧道安全。

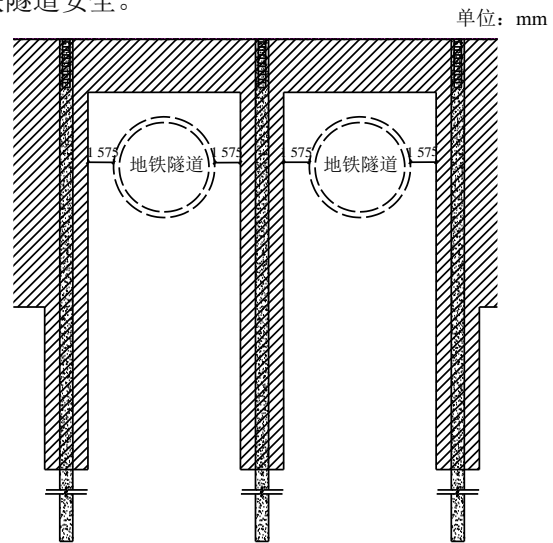


图 2 地铁隧道正上方和两侧的桩体与隧道距离剖面图  
Fig. 2 Section of distance between pile and tunnel above and on both sides of metro tunnel

表1 核心保护区搅拌桩土体加固范围  
Table 1 Soil reinforcement scope of mixing pile in core protection area

编号	所属位置及作用	桩底标高/m	桩顶标高/m
1	地铁正上方土体满堂加固	-7.80	+1.00
2	地铁隧道边缘止水帷幕	-30.00	+1.00
3	地铁侧上方土体满堂加固	-21.00	+1.00
4	东西侧地铁正上方直立水泥石土挡墙	-7.80	+3.00
5	东西侧地铁侧上方直立水泥石土挡墙及南北侧基坑止水帷幕	-21.00	+3.00
6	地铁隧道边缘止水帷幕延伸部分	-30.00	+3.00

注：地铁隧道顶标高为-9.3 m。

下面以核心保护区搅拌桩施工为例，分别阐述三轴搅拌桩和 MJS 工法桩两种土体加固施工工艺。通过对比两者的施工工艺机理和实际施工效果，来分析比较两种施工工艺在保护运营地铁隧道安全方面的差异。

### 3 施工工艺对比

#### 3.1 三轴搅拌桩

三轴搅拌桩是采用三轴型钻掘搅拌机在现场向设计深度进行旋转掘进，同时在灰浆系统及高压风系统的配合作用下，在钻头处喷射出水泥浆液，钻头及螺旋钻杆将水泥浆与原位土体反复混合搅拌，在各桩单元之间采取重叠搭接咬合方式施工，使土体的均匀性、自立性、密实度、抗压强度等性能参数指标提高，从而满足设计需求的一种施工工艺<sup>[7]</sup>。其土体改良的机理是：用水泥作为固化剂加固软土，水泥和软土将产生一系列物理和化学反应，从而增加了颗粒之间的黏结力，增加了土体的强度和密实度，形成具有一定强度和稳定性的水泥加固土。改良后的土体在抗压强度指标上远远高于原天然软土强度，土体压实度及抗渗性比天然软土也大大提高。在加固软土时，由于水泥的掺量较小，一般仅占被加固土重的 5%~18%，水泥的水化反应完全是在具有一定活性的土体颗粒的围绕下进行，所以硬化速度较为缓慢。

#### 3.2 MJS 工法桩

MJS工法是从综合角度出发，将硬化材料泥浆的配料直至加压输送、喷射、地层切削、混合、强制排泥、集中泥浆这一系列工序作为监控对象。是一种能进行水平地基加固和360°全方位地基加固的施工工法，对于周边环境及地基扰动影响极其微小，能实施大深度地基加固及水面下的施工，并且可以选择排泥场所。

MJS工法桩加固土体分为两个阶段：

第一阶段为引孔阶段，预钻孔施工过程中随时监测钻孔垂直度及地层稳定情况，并及时纠偏。成孔后及时测孔，垂直度控制在1/150。由于地层被扰动后自稳定性能较差，预钻孔成孔过程中采用膨润土人工造浆护壁，泥浆黏度 $\geq 20$  s。

第二阶段为摇摆喷射阶段，通过安装在钻头底部侧面的特殊喷嘴，置入土体深度后，用高压泵等高压发生装置，以40 MPa左右的压力将硬化材料及空气从喷嘴喷射出去，并一边将多孔管抽回。由于高压喷射流具有强大的切削能力，因此，喷射的浆液一边切削四边土体，土体在喷射流的冲击力、离心力和重力等作用下，与浆液搅拌混合，并按一定的浆土比例及质量大小有规律地重新排列，浆液凝固后，便在土中形成各种形状的加固体。

MJS工法桩摇摆喷射是采用步进喷射，即一步一步向上喷，一步作为一个步距，通常每一个步距为25 mm，每一个步距来回喷射一个单位时间，单位时间根据摇摆角度确定。

加固体的半径和许多因素有关，其中包括喷射压力 $P$ 、提升速度 $S$ 、现场土的剪切强度 $\tau$ 、喷嘴直径 $D$ 和浆液稠度 $B$ 等。

加固范围与喷射压力 $P$ 、喷嘴直径 $D$ 成正比，而与提升速度 $S$ 、土的剪切强度 $\tau$ 和浆液稠度 $B$ 成反比。

加固强度与单位加固体中的水泥含量、水泥浆稠度和土质有关。单位加固体中的水泥浆含量愈高、喷射的浆液愈稠，则加固强度愈高。此外，在砂性土中的加固强度显然比在软弱黏性土中的加固强度高。

#### 3.3 两者工艺机理对比

三轴搅拌桩和 MJS 工法桩工艺机理对比如表 2 所示。

#### 3.4 两者优缺点对比

三轴搅拌桩和 MJS 工法桩优缺点对比如表 3 所示。

表 2 三轴搅拌桩和 MJS 工法桩工艺机理对比  
Table 2 Comparison of mechanism between triaxial mixing pile and MJS method pile

对比项目	三轴搅拌桩	MJS 工法桩
成桩设备	设备高度一般超过 30 m, 较为笨重	设备高度一般不超过 3 m, 较为轻巧
成桩方式	搅拌喷射	摇摆喷射
成桩深度	有效加固深度一般不超过 30 m	有效加固深度一般可达 50 m 以上
成桩桩径	成桩桩径小, 以 650 mm、850 mm 居多	成桩桩径大, 可达 3 m
喷浆压力	≤1.0 MPa	40 MPa 左右
排泥(浆)方式	气升作用, 无法控制排泥(浆)量	强制吸引排出, 可控制排泥(浆)量
排泥(浆)通道	钻杆与原状土之间的间隙	多孔管内专用排泥(浆)管
地内压力控制	无专用设备控制	有专门的量测和调控地内压力系统设施

表 3 三轴搅拌桩和 MJS 工法桩优缺点对比  
Table 3 Comparison of advantages and disadvantages between triaxial mixing pile and MJS method pile

优缺点	三轴搅拌桩	MJS 工法桩
优点	施工效率高; 桩体强度高, 桩身均匀性好; 造价低经济性好。	施工效率高; 桩径大, 桩身质量好; 施工扰动小, 地内压力可控; 可 360°全方位施工, 加固截面形状多变; 施工占地面积小。
缺点	挤土效应较为明显, 施工扰动较大; 施工时地内压力较大, 深部排泥困难; 施工占地面积较大, 环境污染较大。	造价高经济性差; 需安排吊机配合施工; 有一定的环境污染。

### 4 三轴搅拌桩施工影响

#### 4.1 施工区块划分

项目初始, 根据设计要求, 核心保护区土体加固采用 Φ850 三轴搅拌桩施工。根据三轴搅拌桩所处位置与地铁 1 号线的关系, 将施工区域分为 6 个大区块。1 区为地铁正上方土体满堂加固部分; 2 区为地铁隧道边缘止水帷幕; 3 区为地铁侧上方土体满堂加固部分; 4 区为东西侧地铁正上方直立式水泥石土挡墙; 5 区为东西侧地铁侧上方直立式水泥石土挡墙及南北侧基坑止水帷幕; 6 区为地铁隧道边缘止水帷幕延伸至核心区基坑外部分。具体如图 3 所示。

#### 4.2 施工实施

三轴搅拌桩施工分试桩和全面施工两个阶段:

(1) 前期选定 1 号、2 号、3 号 3 个小区域进行三轴搅拌桩试桩施工, 后期增加 4 号、5 号两个小区域。1 号试桩区为地铁隧道侧边, 桩体距地铁隧道最小距离 1.495 m; 2 号试桩区为地铁隧道正上方, 桩体距地铁隧道最小距离 1.5 m; 3 号试桩区为上下行线地铁隧道中间, 距地铁隧道最小距离 1.552 m;

4 号试桩区为地铁隧道侧边, 桩体距地铁隧道最小距离 2.38 m; 5 号试桩区为上下行线地铁隧道中间, 桩体距地铁隧道最小距离 1.435 m。具体如图 4 所示。

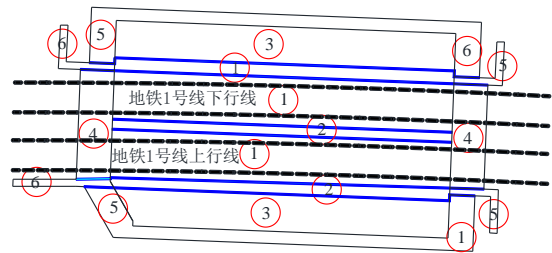


图 3 三轴搅拌桩施工分区  
Fig. 3 Construction zone of triaxial mixing pile

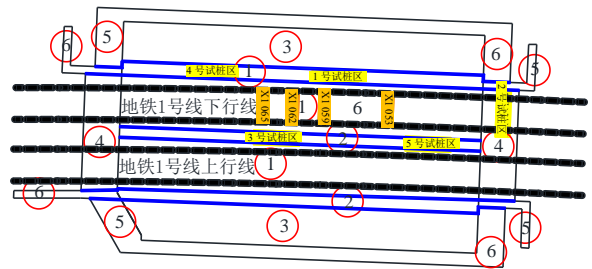


图 4 试桩区域及部分监测点布置示意图  
Fig. 4 Layout diagram of test pile area and monitoring points

(2) 1 号、3 号试桩区搅拌桩采用顺序咬合法搭

接施工,搭接长度为250 mm,幅向与地铁隧道呈平行关系。2号试桩区搅拌桩采用全断面套打法施工。4号、5号试桩区采用顺序咬合法搭接施工,幅向改为与地铁隧道垂直关系。具体如图5所示。

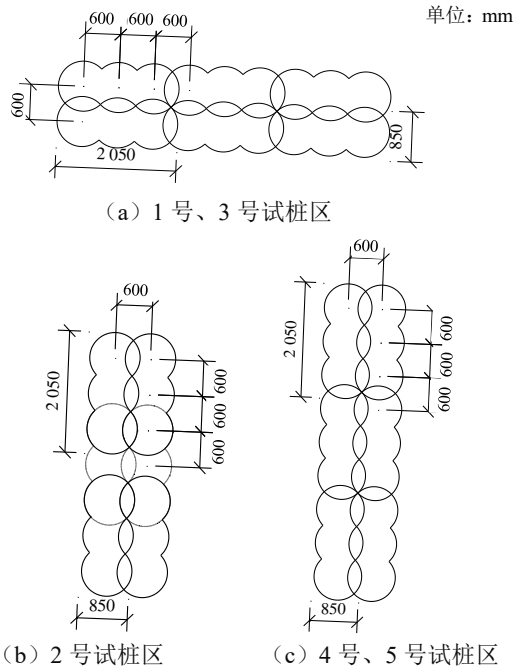


图5 三轴搅拌桩试桩区搭接及幅向示意图

Fig. 5 Schematic diagram of overlapping and amplitude direction of triaxial mixing pile test area

### (3) 试桩结论:

a) 2号试桩区在隧道正上方施工,施工影响较小;1号、3号试桩区采用平行于隧道的方式施工,1号试桩区地铁隧道管片收敛值+1.6 mm(接近初定报警值±2 mm);3号试桩区下行线地铁隧道管片收敛值在试桩开始时不断增加,区域施工结束数据维持在+2.5 mm(超过初定报警值±2 mm)。

b) 鉴于1号、3号试桩区的情况,后增加4号、5号试桩区采用垂直于隧道方向跳三幅施打,施工影响得到有效改善,未再发生报警。

c) 施工对地铁隧道拱顶沉降和水平位移影响

较小,对管片收敛有一定影响。

### (4) 施工技术参数

a) 根据试桩情况,确定三轴搅拌桩全面施工阶段技术参数<sup>[8-9]</sup>如表4所示。

b) 总体按照“2→6→1→3→4→5”的先后顺序进行分区施工(施工分区见图3);1、3、4、5区块采用平行于隧道轴线方向跳一幅间隔施打;2、6区块采用垂直与隧道轴线方向跳三幅间隔施打;区块进一步分小区块跳槽施工;1~3区采用顺序咬合法搭接施工,横向与纵向搭接长度都为250 mm,4~6区采用全断面套打法施工,每排搅拌桩搭接长度为250 mm(具体参照图5)。

c) 调整地铁隧道监测预警及控制指标:拱顶沉降报警值-4.0~+3.0,控制值±10 mm;管片收敛报警值-2.0~+3.5,控制值±5 mm;水平位移报警值±2.0,控制值±5 mm。(注:拱顶沉降以隆起为“+”,管片收敛以直径增大为“+”,水平位移以向北侧变形为“+”)。

### (5) 全面施工阶段

全面施工自2020年5月2日从2区开始实施,至5月8日完成21幅三轴搅拌桩(地铁隧道下行线北侧11幅,上下行线中间10幅)后,地铁隧道变形值发生1.5~2.1 mm的突变。下行线1个地铁管片累计拱顶沉降达到报警值-4.0 mm;下行线5个地铁管片累计收敛超报警值,1个地铁管片累计收敛超控制值(±5 mm),达到-5.1 mm,现场三轴搅拌桩被迫暂停施工。通过监测数据跟踪,变形仍有继续增大趋势。2020年5月1—11日,地铁隧道部分监测点(布置位置见图4)拱顶沉降累计值、管片收敛累计值时程曲线如图6~7所示。经原因分析,可能为三轴搅拌桩施工扰动较大,无法很好的控制地内压力和地铁隧道侧方土体应力损失。因此,对地铁1号线节点保护工程土体加固工艺及相关施工要求进行调整,将2区、6区三轴搅拌桩工艺调整为MJS工艺。

表4 三轴搅拌桩全面施工阶段技术参数

Table 4 Technical parameters at full construction stage of triaxial mixing pile

水泥标号	水灰比	水泥掺量	喷浆压力/ MPa	下沉搅拌速度/ (m/min)	提升搅拌速度/ (m/min)	下沉流量/ (L/min)	提升流量/ (L/min)
1~3区标高-4.4 m~+1.0 m							
P·O42.5	1.5	范围水泥掺量为10%,其余为20%	≤0.8	0.4	1.0	290	290

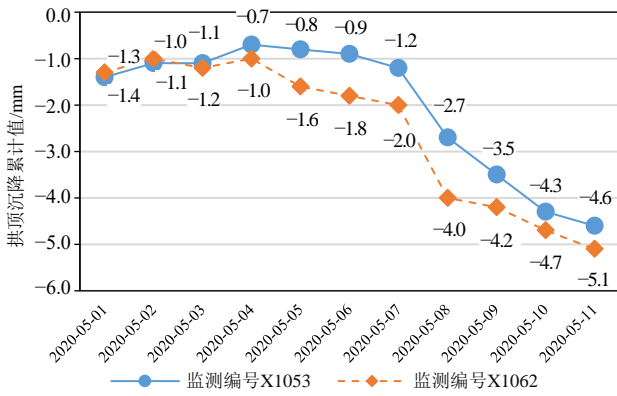


图 6 拱顶沉降累计超报警值监测点时程曲线图

Fig. 6 Time history curves of arch crown accumulative settlement of exceeding alarm value monitoring points

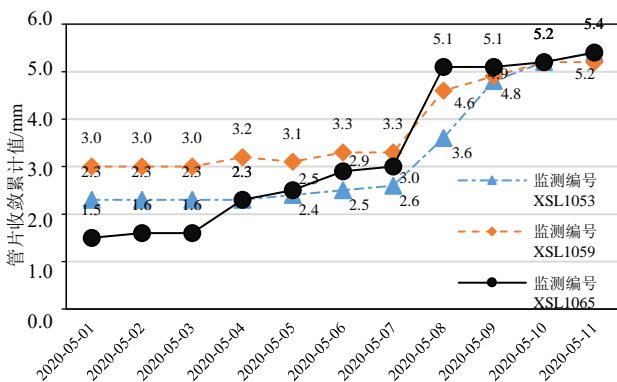


图 7 管片收敛累计超控制值监测点时程曲线图

Fig. 7 Time history curves of cumulative segment convergences of exceeding control value monitoring points

## 5 MJS 工法桩施工影响

### 5.1 设计变更方案概述

MJS 工法桩具有施工扰动小和地内压力可控的优点,但鉴于 MJS 工法桩的成本较高,设计变更主要针对成桩对地铁隧道变形影响较大、位于地铁隧道两侧及之间的 2 区及 6 区水泥搅拌桩,其余区域仍采用三轴水泥搅拌桩。具体方案如下:

(1) 调整 2 区土体加固范围布置,弱加固区(标高-4.4 m 以上)仍为三轴搅拌桩,强加固区(标高-30~-4.4 m)调整为 MJS 工法桩,直径 3 000 mm 的半圆,搭接长度 800 mm,加固体宽度调整为 2.1 m,使桩体外沿与地铁隧道外沿距离不小于 1.72 m。

(2) 调整 6 区土体加固范围布置,对 6 区除西南侧以外的加固土体由条形改为折形,将折形距隧道外缘 6 m 以内的区域调整为 MJS 工法桩,直径 2 000 mm 的半圆,搭接长度 800 mm,加固体宽度

调整为 1 m。

(3) 针对 2、6 区部分已完成水泥搅拌桩施工的区域,其 MJS 工法桩根据不同情况采用不同的布桩方案,如表 5 所示。

### 5.2 施工实施

MJS 工法桩施工大致可分为试桩阶段和全面施工 1、2、3 阶段:

(1) MJS 试桩从 2020 年 8 月 8 日开始至 9 月 25 日结束,共计完成 28 根,试桩区域为地铁隧道侧边和上下行线地铁隧道中间。从施工期间跟踪监测数据看,地铁隧道变形值增量小,与之前三轴搅拌桩相比监测数据更加良好,且相比三轴搅拌桩持续破坏原状土强度导致收敛累计值一直增大,MJS 试桩施工受前 3 根影响较大,后期由于 MJS 成桩强度上来,监测数据趋于稳定,地铁隧道变形更加平缓。

#### (2) 施工技术参数

a) 根据试桩情况,确定 MJS 工法桩全面施工阶段技术参数<sup>[10-11]</sup>如表 6 所示。

b) 采用跳桩施工,跳桩间隔按 3 倍有效桩径,相邻桩施工间隔时间不小于 72 h。隧道侧壁的 2 区设计为两排 MJS 工法桩,在施工时,优先施工离地铁隧道管片较近的 MJS 工法桩,在强度形成后,再进行对侧桩施工,可有效形成隔离墙发挥效果。

#### c) 重新调整地铁隧道监测预警及控制指标:

拱顶沉降预警值±6 mm,报警值±8 mm,控制值±10 mm;管片收敛预警值±6 mm,报警值±8 mm,控制值±10 mm;水平位移预警值±3 mm,报警值±4.0,控制值±5 mm。

#### (3) 全面施工阶段

a) 一阶段(2020-09-27—2020-10-28):下行线地铁隧道 2 个管片累计拱顶沉降超预警值,1 个管片累计收敛达到报警值。分析原因为 MJS 旋喷施工破坏原状土强度,且孔内地内压力无法保持,造成土体扰动,土体侧向约束减少,导致拱顶下沉,管片收敛水平横向扩张。项目部对施工技术进行了局部调整:先施工背离区间隧道的 MJS 桩位且跳桩间距大于 10 m;调整水泥浆稠度及水泥浆硬化时间,采用 42.5R 或 52.5 水泥;优化施工气压及气量控制;减小引孔孔径,避免孔口翻浆,确保地内压力可控。

b) 二阶段(2020-10-29—2020-11-27):上行线地铁隧道监测数据可控;下行线地铁隧道共计 4 个管片拱顶沉降超报警值,9 个管片累计收敛超报警值,最大拱顶沉降-9.4 mm,最大管片收敛 9.6 mm。

表5 水泥搅拌桩施工完成区域 MJS 工法桩布桩方案

Table 5 MJS method layout schemes for cement mixing pile construction completion area

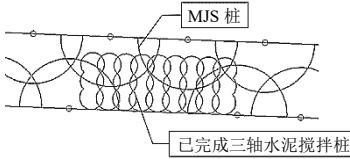
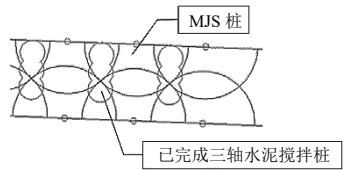
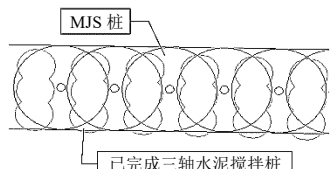
施工情况	方案
情况一：对于已完成的1号~5号的试桩区域，其三轴搅拌机加固体已形成块体，沿着块体布桩，如右图所示：	
情况二：对于已完成的跳三幅施工的三轴搅拌桩区域，沿着已形成桩体中心对称布桩半圆形 MJS 工法桩，如右图所示：	
情况三：对于已完成的间隔一幅施工的三轴搅拌桩区域（1区前期试桩区域），沿着已形成桩体的中心布置直径 2 100 mm 的 MJS 工法桩，如右图所示：	

表6 MJS 工法桩全面施工阶段技术参数

Table 6 Technical parameters of MJS method pile at full construction stage

项目	参数
水泥标号	P·O42.5
水灰比	1:1
水泥掺量/%	40
地内压力系数 K	1.2~1.5
水泥浆压力/MPa	40
水泥浆液流量/(L/mim)	135~150
主空气压力/(L/mim)	290
主空气流量/(Nm <sup>3</sup> /min)	1.0~1.4
步距/cm	2.5
转速/(r/min)	3
步距提升速度/s	40
倒吸压力/MPa	8~15
倒吸流量/(L/min)	34~45

经过一阶段的施工技术调整，在二阶段地铁隧道变形仍然没有得到很好的控制，项目部对地铁隧道进行整治后继续施工。

c) 三阶段（2020-11-28—施工结束）：在此后的施工过程中，上下行线地铁隧道拱顶沉降和管片收敛数据仍然在缓慢增大，并且超过了控制值，未能得到有效的控制。

5.3 监测数据分析

(1) 拱顶沉降：自 MJS 试桩开始至施工结束，上下行线地铁隧道拱顶沉降呈下沉趋势，在施工开

始后约 5 个月超过控制值-10 mm，至施工结束最大达到-20.1 mm。上行线平均沉降-2.215 mm/月，下行线平均沉降-1.925 mm/月。累计拱顶沉降最值时程曲线如图 8 所示。

(2) 管片收敛：自 MJS 试桩开始至施工结束，上下行线地铁隧道管片收敛呈扩张趋势，在施工开始后约 5 个月超过控制值 10 mm，至施工结束最大达到 13.3 mm。上行线平均收敛 1.275 mm/月，下行线平均收敛 0.85 mm/月。累计管片收敛最值时程曲线如图 9 所示。

(3) 水平位移：自 MJS 试桩开始至施工结束，地铁隧道累计水平位移：上行线从 1.6 mm 变化到 4.7 mm，下行线从 2.0 mm 变化到 4.5 mm，变化较小，总体良好，均在控制值范围之内。

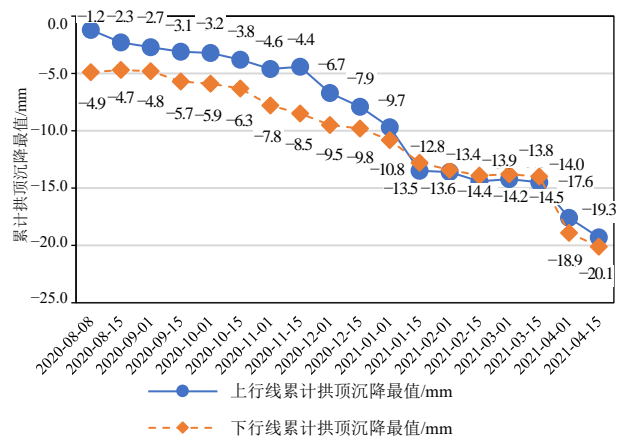


图8 上下行线地铁隧道累计拱顶沉降最值时程曲线图  
Fig. 8 Time history curves of maximum cumulative settlements of metro tunnels

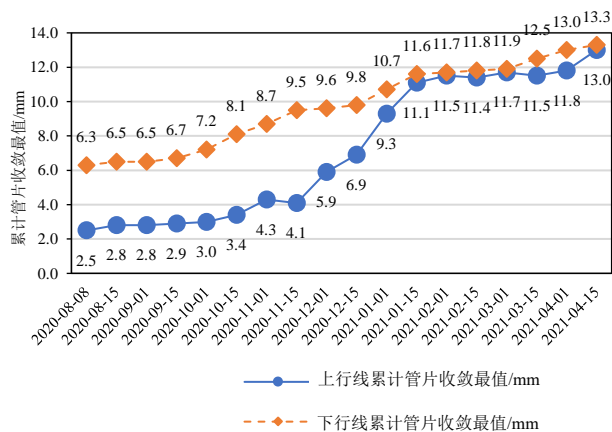


图9 上下行线地铁隧道累计管片收敛最值时程曲线图

Fig. 9 Time history curves of cumulative maximum convergences of subway tunnel segments

## 6 结论

通过对三轴搅拌桩和 MJS 工法桩施工工艺在保护运营地铁隧道安全方面的对比,可以得出如下结论:

(1) 从施工原理、成桩设备、成桩方式、成桩深度(桩径)、排泥(浆)方式、地内压力控制等多方面来看,在不考虑工程造价的情况下, MJS 工法桩要明显优于三轴搅拌桩。

(2) 三轴搅拌桩和 MJS 工法桩对地铁隧道水平位移的控制效果较好,对拱顶沉降和管片收敛的控制效果较差。

(3) MJS 工法桩能使地铁隧道的变形更加平缓,每月的变形值能够控制在 1~2 mm 左右,不会出现三轴搅拌桩施工时某一天变形 2 mm 的突发情况。

## 参考文献

[1] 羊逸君,姜叶翔,马少俊,等.杭州软土地区地铁保护控制技术探讨[J].市政技术,2018,36(1):116-119,123.  
YANG Yi-jun, JIANG Ye-xiang, MA Shao-jun, et al. Discussion on subway protection and control technology in Hangzhou soft soil area[J]. Municipal Engineering Technology, 2018, 36(1): 116-119, 123.

[2] 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.

[3] 洪成泼.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 Cheng-po. Study on construction and application of the MJS (Metro Jet System) soil stratum in Shanghai[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[4] 刘飞,韩建勇.近地铁轨行区微扰动三轴搅拌桩试验研究[J].建筑施工,2020,42(10):1838-1840.  
LIU Fei, HAN Jian-yong. Experimental study on micro-disturbance triaxial mixing pile near subway track area[J]. Building Construction, 2020, 42(10): 1838-1840.

[5] 陈杰华.快速路上跨地铁隧道 MJS 加固技术研究[J].广东土木与建筑,2020,27(5):57-60.  
CHEN Jie-hua. Research on MJS reinforcement technology of metro tunnel on expressway[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2020, 27(5): 57-60.

[6] 康林.富水黏土地层中密贴既有隧道车站施工 MJS 工法的应用[J].工程建设与设计,2021(4):171-172,175.  
KANG Lin. The application of MJS method in the construction close to existing tunnel station in water-rich clay stratum[J]. Construction & Design for Project, 2021(4): 171-172, 175.

[7] 林贤槟.关于三轴搅拌桩止水帷幕施工技术管理要求[J].建筑学研究前沿,2018(17):1-3.  
LIN Xian-bin. Technical management requirements for water stop curtain construction of triaxial mixing pile[J]. Frontiers of Architectural Research, 2018(17): 1-3.

[8] 文新伦.紧邻地铁隧道的三轴搅拌桩施工参数选择与应用[J].建筑施工,2010,32(4):316-318.  
WEN Xin-lun. Selection and application of construction parameter of triaxial mixing pile close to metro tunnel[J]. Building Construction, 2010, 32(4): 316-318.

[9] 郑坚杰.三轴搅拌桩微扰动施工工艺参数比选[J].市政技术,2018,36(2):173-176,180.  
ZHENG Jian-jie. Parameter comparison of perturbation technique of three-axle mixing pile[J]. Municipal Engineering Technology, 2018, 36(2): 173-176, 180.

[10] 李兴国,高亮,王凯,等.MJS 工法在紧邻地铁工程中的应用[J].建筑施工,2016,38(2):131-133.  
LI Xing-guo, GAO Liang, WANG Kai, et al. Application of MJS construction method to engineering adjacent to subway[J]. Building Construction, 2016, 38(2): 131-133.

[11] 周章海,周晓南.MJS 工法在杭州地铁盾构下穿工程中的应用研究[J].铁路工程技术与经济,2021,36(2):19-22.  
ZHOU Zhang-hai, ZHOU Xiao-nan. Application and study on metro jet system in Hangzhou soft soil stratum in shield tunneling project[J]. Railway Engineering Cost Management, 2021, 36(2): 19-22.