

# Analysis of the rectangular pipe jacking process of the operating subway tunnel pipe jacking project

Qichen Wu

Shanghai Construction Engineering Group Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

## Abstract

With the increase of the development density of urban underground space, pipe jacking construction faces severe challenges when crossing the existing operating subway tunnel. Under the background of the underground channel project from plot 56-01 to 75-02, the construction technology and control measures of the tunnel of metro line 13 are systematically studied. By dividing the pipe jacking crossing stage, optimizing the construction parameters and implementing dynamic monitoring, the tunnel settlement and deformation are effectively controlled. The monitoring data showed that the maximum settlement of the subway tunnel was 0.8mm, and the convergent deformation was 1.7mm, which verified the feasibility of the process. The results provide a technical reference for similar projects, emphasizing the importance of soil pressure balance, grouting reinforcement and real-time monitoring.

## Keywords

Rectangular pipe jacking; subway tunnel; upper crossing construction; soil pressure balance; dynamic monitoring

## 上穿已运营地铁隧道顶管项目矩形顶管工艺的探析

吴启晨

上海建工集团股份有限公司, 中国·上海 200000

## 摘要

随着城市地下空间开发密度的增加, 顶管法施工在穿越既有运营地铁隧道时面临严峻挑战。本文以上海张江56-01至75-02地块地下连通道项目为背景, 系统研究了矩形顶管上穿运营地铁13号线隧道的施工工艺及控制措施。通过划分顶管穿越阶段、优化施工参数、实施动态监测, 有效控制了隧道沉降与变形。监测数据显示, 地铁隧道最大沉降为0.8mm, 收敛变形为1.7mm, 验证了工艺的可行性。研究结果为类似工程提供了技术参考, 强调了土压平衡、注浆加固与实时监测的重要性。

## 关键词

矩形顶管; 地铁隧道; 上穿施工; 土压平衡; 动态监测

## 1 工程概况

### 1.1 项目背景

项目位于上海市浦东新区张江地区, 地下连通道全长42m, 连接56与75地块地下结构, 需上穿运营中的地铁13号线双线隧道。顶管段覆土平均厚度3.8m, 管节外尺寸为9100×4400×1500mm, 采用C50预制钢筋混凝土管节拼装。

### 1.2 地质条件

场地属滨海平原地貌, 地层主要由填土、淤泥质粘土及粉砂组成。顶管穿越地层为②层粉质黏土(厚度0.7~2.4米)与③层淤泥质黏土(厚度5.0~6.2米), 土体强度低、压缩性高。地下水以潜水为主, 埋深0.3~1.2m, 对施工稳定性影响显著。

### 1.3 加固情况

顶管始发井、接收井为新建基坑工程, 采用 $\Phi 1200@$

1400 钻孔灌注桩+ $\Phi 2400@1600$ MJS 外圈止水加固, 基坑挖深近10m, 设置两道钢筋混凝土支撑。基坑采用搅拌桩满堂加固, 顶管进出洞加固采用 $\Phi 2400@1600$ MJS 加固, 始发井开挖取芯检测, 强度等级不小于1.5Mpa。始发井开挖面积435平方米, 接收井开挖面积130平方米。基坑安全等级为二级, 环境保护等级为一级。

### 1.4 工程重难点

本工程顶管推进上穿运营中的轨道交通13号线隧道, 始发井围护体距离轨交隧道7.79m, 接收井围护体距离轨交隧道7.1m, 顶管底部距离隧道顶部约4.465m, 作为对社会影响极大的运营地铁设施, 施工时必须保证地铁的绝对安全, 如何保证推进对地铁造成最少甚至无影响尤为重要。此外, 淤泥质黏土易引发开挖面失稳, 既有地铁隧道对施工振动敏感, 在施工过程中均需要重点控制。

【作者简介】吴启晨(1990-), 男, 中国上海人, 本科, 工程师, 从事建筑施工管理研究。

## 2 上穿地铁施工方案

### 2.1 穿越 13 号线隧道前期重点准备工作

#### 2.1.1 现场踏勘及资料收集

穿越施工前,先到地铁 13 号线相关单位办理穿越手续,达成一致的穿越要求及协议,在获得穿越许可的情况下,方可实行推进;到盾构穿越段的地铁结构内部进行现场踏勘,了解现场的工况条件,以进一步了解该结构的变形情况。

#### 2.1.2 技术准备

①在矩形通道进入试推进段及穿越段前,分别进行 1 次测量复核。复核顶管机里程,确认顶管机与地铁线路的相对位置,同时明确顶管机穿越时各个工况的位置;复核顶管机姿态确保顶管机能及时调整,以良好的姿态穿越地铁 13 号线。

②为确保顶管机顺利穿越地铁线,在穿越前,对所有施工人员进行技术交底。使每一个参加施工的工作人员清楚了解矩形通道与地铁线之间的相对位置,以及矩形通道穿越流程。在顶管机操作室张贴相关技术交底、穿越流程及重点控制措施。此外,使施工人员了解相关的应急预案,及发生突发事件的简单处理方法,便于争取时间。对穿越时期设备推进参数设定、千斤顶顶力分配、技术指令执行、履带设备使用、顶管机使用、测量复核等细节进行一次全面交底,保证穿越期间连续稳定推进施工。

③为避免穿越过程中,隧道上浮现象的发生。在穿越过程中准备好压重材料(配重材料采用配重铁的形式压重)。

④始发前根据《监测方案》对穿越区域的地面进行监测点布设,并测得初始值。

#### 2.1.3 设备物资准备

设备管理上,穿越前,仔细对设备进行一次检查和保养,特别是矩形顶管机,认真检修存在的问题,保证在良好的工况条件下进行穿越施工。同时,仔细检查注浆顶管机和注浆设备的完好性,并保证注浆设备的正常。制定详细的物资供

应计划,向管节、注浆材料等厂家明确穿越期间的连续供应要求。避免由于设备故障、材料供应不足等原因导致施工停顿,影响整个穿越施工控制。

应急物资到位,并安排专人值班,协调管节,浆液配送和出土等施工环节,确保顶管连续稳步推进。

#### 2.1.4 建立联系网络

建立以地铁 13 号线相关单位、地铁监测单位、地铁项目公司、顶管项目施工总包单位、地面监测单位、监理单位的互联互动的项目管理组织架构;施工操作层上,建立施工方分管领导、项目经理、项目部各管理部门、推进班组各工种之间的联系网络。管理层及施工操作层联系网络的建立,便于信息及时有效的传递,整个穿越运转体系更流畅。

### 2.2 穿越控制阶段划分

根据顶管穿越地铁线的工况特点,将顶管穿越地铁分为 4 个阶段,分别为顶管穿越前试推进和试推进阶段,顶管穿越阶段、顶管穿越后控制阶段和贯通后的加固保护阶段。

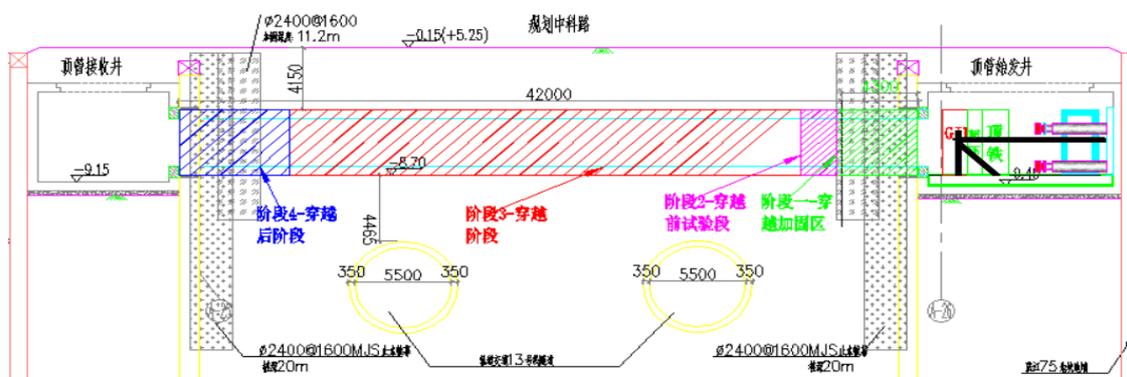
第一阶段(始发阶段):矩形顶管机机头空推、安装止退架、出始发加固区(里程 0~4.6m);

第二阶段(试推段):矩形顶管机机头出始发加固区后,进入顶管穿越前试推进和控制阶段(里程 4.6~6.9m);

第三阶段(穿越阶段):13 号线隧道上行线外扩 3 米至下行线外扩 3 米之间的距离为顶管穿越阶段(里程 6.9~35.9m);

第四阶段(穿越后):13 号线隧道下行线外扩 3 米至顶管贯通后为顶管穿越后控制保护阶段(里程 35.9~42m 至贯通后注浆)推进试验段

在推进试验段,主要为穿越 13 号线的前 7 米阶段,主要就土压力、出土量、推进速度、注浆量和注浆压力设定与地面沉降关系进行分析,掌握此段顶管通道推进土体沉降变化规律以及摸索土体性质,以便正确设定穿越 13 号线的施工参数和采取相应措施减少土体沉降,以确保穿越段 13 号线的安全。



穿越阶段划分示意图

## 2.3 始发阶段施工

### 2.3.1 矩形顶管设备顶至洞门内

开启左下、右下2个千斤顶开始推进，缓慢推至洞门内，并时时刻刻注意刀具进入橡胶止水装置内的过程，防止刀具刮伤橡胶帘布板。

推进至切口里程1.8m，刀盘刀尖靠上加固区，在刀尖靠上加固区前，先安装首节管、顶环。

通过壳体胸板上预留注浆孔向土仓内压注6~10m³改良剂浆液，逐步缓慢建立土压力，并时刻关注顶管机姿态。

通过洞门预留孔，先初步注入固体粘土，封闭洞门与设备四周空隙。

### 2.3.2 洞口环缝注浆填充

设备顶至加固区500~900mm的时候，前置土仓已经建立土压力值，故进行洞口四周环缝注浆，填充洞口空隙，注浆浆液采用固体的粘土浆液。并随着顶进，随时进行洞口补充注浆。洞门填充注浆可以从洞门的预留孔内注浆或者从设

备上预留的泥垫孔进行注浆。

### 2.3.3 安装止退装置

设备顶至里程4.3米的时候，在安装第二节管节前，先安装止退装置（双节单止退），固定第一节管节向后退的趋势。

### 2.3.4 设备出加固区

设备顶至里程4.6米的时候，设备出加固区后，机头外注射改良浆液，改良土体。周围土体减摩浆液从设备的四周注浆口向外注射。第一节管节从2寸注浆口向外注射固体浆液或洞门预留注浆孔向洞门内注射固体浆液，补充洞门空隙间隙。并适当提高正面土压力的设定，比理论值高0.01MPa。

## 2.4 试推进后优化的参数

在试推进阶段主要是顶管机出发加固区后，根据地面和管线沉降和融起、土压变化、顶力过程中的变化情况等情况采集如下参数：

序号	参数名称	备注
1	正面土压力设定	根据试推进情况和地面变化情况，确认穿越过程的土压力设定和微调值的幅度
2	正面顶力的监测	根据试推进的每节管节的顶力的增加范围，监测每推进一节管节是否在增加的范围，不允许突变增加或减少正面顶力
3	出土量	根据地面和试推进的情况，控制出入量的范围
4	推进速度	根据试推进的速度的情况，规范穿越时的推进速度为一个控制值
5	注浆量、注浆压力、补浆量	根据试推进和地面情况，规范穿越过程中每节注浆量和注浆压力

## 2.5 穿越13号线上下行线

### 2.5.1 穿越前技术交底

在穿越13号线隧道前，根据试推进的收集的各项参数，进行有针对性的技术交底，交底范围为顶管施工各层技术管理人员、各班组工人等。

### 2.5.2 正面平衡压力设定

根据推进试验段所得到的正面平衡压力P1，反算出静止土压力k0和土体平均重度γ的微调值： $k0' * \gamma' = P1/h1$ ；再根据穿越段的实际埋深计算出穿越段的正面平衡压力： $P2=k0' * \gamma' * h2$ ；顶管在穿越施工中参照以上方法来取得平衡压力的设定值，并根据顶管埋深、所在位置的土层状况以及监测数据进行实时优化调整，每次调整的幅度以试推进确认。

### 2.5.3 出土量

根据分析推进试验段每箱土的推进距离，确定一个合适的推进距离，并按该值严格把关每箱土的推进距离，推算每环推出土量，出土量控制为开挖断面的98%~100%，防止出现超挖和欠挖现象，穿越段还需继续分析并进行微调。

### 2.5.4 推进速度

在穿越区施工过程中，顶管机推进速度控制稳定在10mm/min内，并根据推进试验段的速度的控制常值，并维持推进速度常态值，确保顶管均衡、匀速地穿越13号

线，以减少对周边土体的扰动影响，以免对其结构产生不利影响。

### 2.5.5 管节拼装

在管节进行拼装的状态下，由于千斤顶的收缩，必然会引起顶管机的后退，因此在顶管推进结束之后不要立即拼装，等待2~3分钟之后，到周围土体与顶管机固结在一起后再进行千斤顶的回缩，回缩的千斤顶应尽可能少，并应逐一伸缩千斤顶，以满足管节拼装即可，保持开挖面的平衡压力。拼装过程中，顶管司机注意土压力的控制，必要时通过反转螺旋机维持顶管前方土体平衡。同时，尽量熟练拼装工艺，确保优质快速拼装管节。在恢复推进时，应避免先行启动螺旋机，应先恢复顶管的平衡压力，适当可以先推进略微的距离，防止平衡压力下降。

### 2.5.6 减摩泥浆压注及二次补压浆

#### ①减摩泥浆压注。

根据推进试验段确定注浆量和注浆压力进行同步注浆，特别地，当穿越过程中顶管机推进速度较慢时，应严格控制浆液压注的均匀性，避免注浆过于集中或间断，尽量有效合理填充建筑空隙。压浆指派专人负责，对压入位置、压入量、压力值均作详细记录，并根据地层变形监测信息及时调整，确保压浆工序施工质量。

#### ②二次补压浆。

顶管机穿越后还需根据监测情况进行二次补注浆。

### 2.5.7 顶管姿态控制

在穿越段，顶管机进行平面及高程纠偏会增加对土体的扰动，因此在确保顶管机正面沉降控制良好的情况下，尽可能使顶管机匀速、直线通过，减少顶管机纠偏量和纠偏次数。

### 2.5.8 管节内“压铁”

地铁13号线已建设贯通，由于13号线上部的土体被管节替换，此部分的管节重量没有土体重，故顶管过程中，和顶管相交的13号线可能会产生上浮的现象。

为保证顶管穿越后13号线因上部土体减轻重量产生上浮的情况，现在对穿越后的管节内部增加“压铁”增加管节的重量，单条轨道上方压8节，每节压重约5t（根据监测数据进行调整）。

配重的形式和运输：在矩形通道两边设置小轨道车，并在轨道车上安放钢板。

### 2.5.9 反压粘土

地铁13号线上浮，主要为其顶部的土体卸荷，在管节内部，通过粘土输送泵，增加管节底部和13号线之间的土体，增大管节底部的压力，尽可能控制地铁隧道结构上浮。

## 2.6 穿越后控制阶段

由于顶管顶进施工完成后，地面存在一定程度的后期沉降，会对轨道交通造成影响。必须在穿越区域的隧道内准备充足的补注浆材料以及设备，根据沉降监测情况进行后期补注浆。确保将地面及轨道交通的后期沉降控制在允许范围内。

考虑到地铁13号线后期隧道稳定性，穿越完成后，对该区域隧道周围土体进行分层注浆加固，加固范围为管片外2m，浆液为水泥-水玻璃双液浆（体积比1:1），注浆压力不大于0.5MPa，注浆流量控制在10~15L/min，加固后土体强度 $q_u$ 为0.2~0.3MPa并具有良好的均匀性。

双液浆甲、乙两液配比（体积比按1:1）由现场试验，加入适量的促进剂，初凝时间为10~20分钟，必要时确定为30~60秒。

甲液1			乙液1
水	水泥(P.O.42.5级)	膨润土	水玻璃
80~100	100	5~8	50(适量稀释)

为减少浆液渗漏，降低注浆压力，采取分段施工形式，以每4环为一个施工段，每段实施隔环跳孔施工，每环一次施工2只孔。同时，根据监测情况调整注浆量和压力，注浆结束后，拔除注浆管，封闭孔口。每孔按理论分层加固土方量20%浆量进行分层注浆，同时结合注浆压力进行控制。

## 3 监测结果与分析

本项目于2023年12月1日顶管始发，于2023年12月14日顶管接收，日平均推进3m（其中加固区推进共4天，洞门破除2天，常规段推进8天）。

对地铁造成的影响如下。

### 3.1 隧道变形

①竖向位移：最大隆起0.8mm，沉降0.7mm。

②收敛变形：最大收缩值1.7mm。

### 3.2 地表沉降

施工引起地表最大沉降5mm，位于顶管轴线正上方，符合控制标准（ $\leq 10\text{mm}$ ）。

### 3.3 参数优化效果

试推段优化的土压力（0.01MPa增幅）与注浆量（每环 $0.5\text{m}^3$ ）显著降低了地层扰动。

## 4 结论与建议

本次顶管通道施工对运营地铁的影响进行了分析，主要的结论与建议如下：

①矩形顶管上穿地铁隧道需分阶段精细化控制，土压平衡与注浆加固是关键。

②动态监测数据可有效指导施工参数优化。

③施工中应严格控制土压力，严禁超挖欠挖。

④保持恒定的推进速度，适当降低推力，减小对周边环境的影响。

⑤加强施工监测，增加监测频率，根据监测数据指导施工、调整施工参数。

⑥推进结束后，适时进行洞门封堵、隧道注浆，防止对地铁产生影响。

⑦建议后续工程增加三维数值模拟，预演施工对地层的影响。

### 参考文献

- [1] 王建国, 李志强. 顶管法隧道施工对邻近地铁隧道的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 456-463.
- [2] Zhang, Y., & Wang, L. Stability control technology for rectangular pipe jacking in soft soil areas[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103678.
- [3] 上海市工程建设规范. DGJ08-37-2012 岩土工程勘察规范[S]. 上海: 同济大学出版社, 2012.
- [4] 刘辉, 等. 富水砂层顶管施工地表沉降预测模型[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 512-519.
- [5] GB 50497-2019, 建筑基坑工程监测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.