

文章编号: 1007-2993(2024)06-0672-08

# 顶管施工对周边环境的扰动机制研究

王炳华<sup>1</sup> 李文庆<sup>2</sup> 王中华<sup>1</sup> 孟庆军<sup>1</sup> 孙飞祥<sup>2</sup>

(1. 南宁轨道交通建设有限责任公司, 广西南宁 530021; 2. 盾构及掘进技术国家重点实验室, 河南郑州 450001)

**【摘要】** 为确定顶管施工对周边环境的影响, 通过收集工程数据并结合案例监测结果, 对顶管施工引起的地表和既有隧道变形机理及规律进行了研究。结论表明: (1) 地表断面沉降规律符合 Peck 公式, 影响范围约为 1.4~2.6 倍顶管直径, 地表变形发展曲线分为“先隆起后沉降”和“全程沉降”两种形式; (2) 既有隧道上浮总体呈现“反向”Peck 曲线, 上浮量受既有隧道刚度和所受扰动大小影响, 随着时间的增加上浮量先快速增加后趋于稳定; (3) 对上穿既有隧道顶管工程进行监测和分析, 地表和隧道变形规律与已有研究规律基本一致, 采取了数种措施以控制地表和既有隧道的变形, 地表最大沉降量约 11 mm, 既有隧道最大上浮量约 1.6 mm。研究成果可为相关顶管设计和施工提供一定参考。

**【关键词】** 顶管; 地表变形; 既有隧道; 扰动机理; 控制措施

**【中图分类号】** U455.4

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.006

## Disturbance Mechanism of Pipe-Jacking Construction on Surrounding Environment

Wang Binghua<sup>1</sup> Li Wenqing<sup>2</sup> Wang Zhonghua<sup>1</sup> Meng Qingjun<sup>1</sup> Sun Feixiang<sup>2</sup>

(1. Nanning Rail Transit Construction Co., Ltd., Nanning 530021, Guangxi, China; 2. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China)

**【Abstract】** To determine the impact of pipe-jacking construction on the surrounding environment, engineering data was collected and combined with case monitoring results to study the mechanism and laws of surface and existing tunnel deformation caused by pipe-jacking construction. The conclusions are as follows: (1) The settlement law of the surface section conforms to the Peck formula, with an influence range of about 1.4~2.6 times the diameter of the top pipe. The surface deformation development curve is divided into two forms: "uplift first and then settlement" and "full settlement". (2) The overall uplift of existing tunnels presents a "reverse" Peck curve, and the uplift amount was affected by the stiffness of the existing tunnel and the magnitude of the disturbance it is subjected to. With the increase of time, the uplift amount first increases rapidly and then tends to stabilize. (3) Monitoring and analysis were conducted on the pipe-jacking project of the existing tunnel, and the deformation patterns of the surface and tunnel were basically consistent with existing research patterns. Several measures were taken to control the deformation of the surface and existing tunnel, with a maximum settlement of about 11 mm on the surface and a maximum uplift of about 1.6 mm on the existing tunnel. The research results can provide certain references for the design and construction of related pipe-jacking.

**【Key words】** pipe-jacking; surface deformation; existing tunnel; disturbance mechanism; control measures

### 0 引言

作为地下工程主要施工方法之一, 顶管法在市政隧道、综合管廊、地铁车站等工程中运用广泛<sup>[1-2]</sup>。受限于有限的平面空间, 城市地下空间开发趋向更为复杂的立体方向, 上穿、下穿既有隧道工程日益增加, 使得对施工变形控制要求越来越高<sup>[3]</sup>。与盾构法相

比, 顶管法施工最显著的特点是预制管节是在始发井内拼接而非盾构法的原位拼装, 且动力顶进装置位于始发井内, 不同的工作原理导致了对外部环境的扰动机理和规律差异。

顶管施工对外部环境的扰动可以分为两大类, 即对顶管上方的扰动和对顶管下方的扰动。对顶管

作者简介: 王炳华, 男, 1971年生, 汉族, 河北人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事城市轨道交通工程研究。E-mail: 1099409345@qq.com

通讯作者: 李文庆, 男, 1997年生, 汉族, 河南人, 硕士, 主要从事盾构及掘进技术研究。E-mail: 2232975407@qq.com

上方的扰动主要是开挖过程中土体损失而引发的地面沉降,对顶管下方的扰动主要是土体开挖后的卸荷作用导致既有隧道的上浮。国内外学者对顶管施工的扰动问题开展了大量研究。魏纲等<sup>[4]</sup>类比盾构法施工对周围环境的影响,将顶管法对周围土体的扰动划分为7个区,为顶管施工变形研究奠定了基础;郑跃等<sup>[5]</sup>通过机理分析并结合现场实测数据,将顶管施工过程中的地表位移分为波动、隆起、施工沉降、固结沉降4个阶段,发现开挖面稳定和泥浆套技术对减小扰动作用明显;刘浩航<sup>[6]</sup>基于现场实测数据和数值模拟,对顶管开挖引起的地表沉降和既有隧道变形进行了分析,认为顶管开挖对既有隧道的扰动范围约为10 m;李明宇等<sup>[7]</sup>结合现场实测数据发现顶管施工引发的地表沉降符合Peck曲线,影响范围为1.5~1.6倍隧道宽度,对刀盘前方土体的扰动约为1.3~3.0倍隧道宽度;吴垠龙等<sup>[8]</sup>通过现场监测和数值模拟发现顶管施工对下方既有隧道的扰动范围约为2.5倍顶管宽度;徐新等<sup>[9]</sup>利用随机介质理论提出了顶管施工引发的地表沉降计算方法,在均匀收敛模式下与Peck公式计算结果一致;魏纲等<sup>[10]</sup>考虑土体泊松比,采用椭圆形非等量径向土体移动模式,对Sagaseta公式进行了修正,解决了Sagaseta公式计算结果偏小的问题。

目前,针对顶管施工对周围环境扰动的研究主要集中于对单一工程数据和扰动规律的分析,系统研究及对普遍性规律的研究较为缺乏。本文通过收集大量顶管工程实测数据(地表沉降和下方既有隧道上浮监测数据),统计分析了顶管施工对地表和既有隧道变形的影响范围、变形量的发展规律,并结合上穿地铁隧道工程案例,对采取多种减扰措施的工程地表沉降和既有隧道上浮数据进行分析,为顶管工程设计和施工提供一定参考。

### 1 地表扰动变形分析

在顶管顶进过程中,顶管与周边土体相互作用,导致顶管周围土体被扰动,进而威胁既有建/构筑物的安全。顶管顶进对周围的扰动主要包括地表变形、下方既有隧道上浮等方面。魏纲等<sup>[4]</sup>等基于前人的研究将顶管施工对周围土体的影响划分为7个区,分别为挤压扰动区I(顶管机正前方,距机头远,承受挤压应力)、剪切扰动区II(顶管机正前方,距机头近,土体被切削,受力状态复杂)、卸荷扰动区III(在I、II区上方,在顶进过程中,由于掘进机与后续顶管的尺寸差、前期地表的隆起等,导致土体发生卸载沉降)、卸荷扰动区IV(与III区扰动机理类似,仅是边界

条件不同)、剪切扰动区V(掘进时刀盘护盾外壳与土体发生界面剪切,对土体产生扰动)、注浆剪切扰动区VI(注浆后,管-土之间会形成“泥浆套”,摩擦力相较于V区显著减小)、固结区VII(掘进时土体产生超孔隙水压力,掘进后,孔隙水压力消散,发生固结和次固结沉降),各区分布见图1。

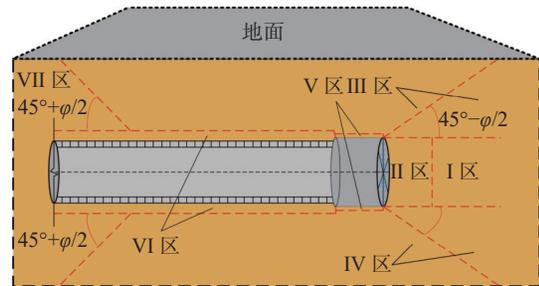


图1 顶管施工扰动分区

在顶管顶进过程中,开挖面一般使用土压、泥水、气压等方式平衡前方土体(剪切扰动区II),若顶进压力过小,则II区土体在侧向土压力的作用下向顶管管道移动,造成土体损失,若顶进压力过大,则I区土体挤压力较大,引起地表隆起,也会造成III区土体产生超孔隙水压力,顶管通过后,孔隙水压力消散,发生固结沉降(即VII区)。顶管机和管节存在外径差,造成部分地层损失,VI区剪切会加剧地层损失量,若减阻效果不佳,还会引发“背土”效应。在顶管顶进过程中,土体变形影响要素多且互相耦合,主要可分为顶进过程中的地层损失和扰动土体的固结两个方面,其中地层损失引发的变形,约占总变形值的85%~90%。

#### 1.1 横断面地表沉降分析

在顶管施工过程中,由于周围土体的扰动和损失,导致上方地表发生沉降,如图2所示。目前,地表沉降应用最广泛的是Peck<sup>[11]</sup>提出的经验公式(简称Peck公式),地表沉降服从正态分布函数,如式(1)所示。

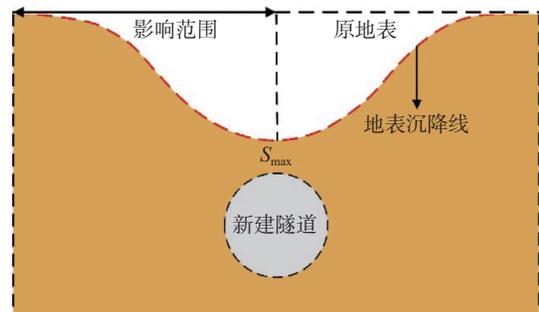


图2 地表沉降示意图

$$S(x) = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2r^2}} \quad (1)$$

式中: $x$ 为地表到隧道轴线的距离; $S(x)$ 为距隧道轴

线  $x$  处的地表沉降;  $S_{\max}$  为地表最大沉降值(隧道轴线上方);  $i$  为沉降槽宽度系数。

由于 Peck 公式中最大沉降值  $S_{\max}$  和沉降槽宽度系数  $i$  是未知的, 导致其很难在工程中直接应用。在过去的数十年间, 众多学者对 Peck 公式进行了补充和完善, 以确定  $S_{\max}$  和  $i$ , 如表 1—表 2 所示, 表中研究对 Peck 公式进行补充, 拓展了 Peck 公式的使用范围。但上述研究更多是基于盾构隧道实测数据, 而对于顶管隧道施工引发的沉降是否适用需进一步研究。

表 1 Peck 公式中最大沉降值  $S_{\max}$  研究

文献	公式
[12]	$S_{\max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} = \frac{V_1 D^2}{0.313i}$
[13]	$S_{\max} = \frac{t}{(a+bt)}$
[14]	$S_{\max} = \begin{cases} (0.4\% \sim 1\%)R & 4R \leq z_0 < 20R \\ (1\% \sim 1.6\%)R & z_0 < 4R \end{cases}$
[15]	$S_{\max} = \frac{(1+\kappa)V_0}{i\sqrt{2\pi}}$
[16]	$S_{\max}(z) = S_{\max} \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^{-0.3}$

注:  $V_s$  为单位长度沉降槽体积;  $V_1$  为地层损失率;  $D$  为隧道等效外径;  $V_0$  为地层损失量;  $\kappa$  为体积变化量与地层损失量的比值;  $t$  为时间;  $a, b$  为参数;  $R$  为隧道半径。

表 2 Peck 公式中沉降槽宽度系数  $i$

文献	公式
[16]	$i(z) = i \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^{-a.3}$
[17]	$\bar{i} = \begin{cases} 0.43z_0 + 1.1 & \text{黏土} \\ 0.28z_0 - 0.1 & \text{粒土} \end{cases}$
[18]	$\bar{I} = K(z_0 - z)$
[19]	$i = -\sqrt{I/2k}$
[20]	$\bar{I} = -0.25 \ln(z_0 - z) + 1.234$

注:  $K$  为沉降相关参数;  $z_0$  为隧道埋深;  $z$  为研究地层深度;  $k$  为拟合参数。

为方便不同工程数据间的对比分析, 收集并处理了大量顶管隧道施工地表沉降监测数据。对于横坐标, 以  $nD$  表示, 即原始数据与隧道直径  $D$ (对于矩形顶管采用面积等效直径)的比值; 对于纵坐标, 对数据进行归一化, 即将原始数据除以最大沉降量。

处理后的数据绘图如图 3 所示<sup>[1,6-7,21-25]</sup>, 各顶管案例地表断面沉降规律基本一致, 在顶管轴线正上方地表沉降量最大, 随着监测点远离轴线, 沉降逐渐减小。

为了分析顶管隧道施工对地面的影响范围及 Peck 公式参数取值范围, 利用 Peck 公式对现场实测数据进行拟合, 得到拟合曲线, 根据《地铁轨道交通

工程测量规范》, 当地表沉降小于 1 mm 时, 可认为该点未受到施工的影响, 故本文假定沉降值为 1 mm 的地表监测点与顶管轴线的距离为  $L_0$ 。拟合采用原始数据, 拟合如图 4, 拟合参数统计如表 3 所示。

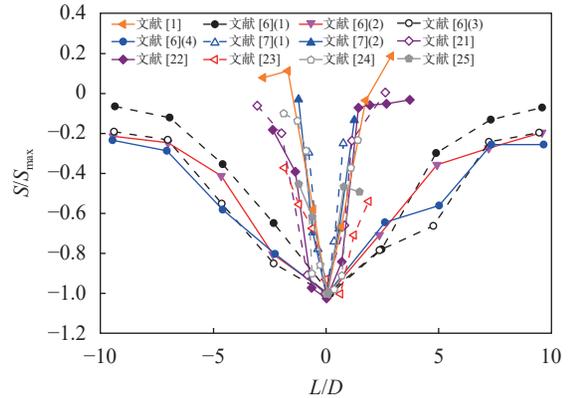


图 3 地表截面沉降相关研究归一化数据图

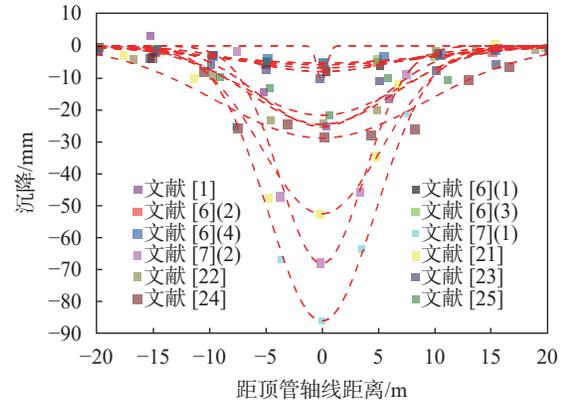


图 4 地表截面沉降数据拟合图

表 3 地表截面沉降相关数据 Peck 拟合参数

文献	$D/m$	$S_{\max}/mm$	$i/mm$	$R^2$	$L_0/m$	$L_0/D$
[1]	10.0	-25.20	5.57	0.941	14.14	1.4
[6]	2.1	-8.05	6.68	0.973	13.65	6.5
	2.1	-6.89	8.21	0.872	16.11	7.7
	2.1	-5.93	9.36	0.896	17.65	8.4
	2.1	-5.38	9.66	0.860	17.71	8.4
[7]	10.0	-86.00	4.74	0.993	14.15	1.4
	6.1	-68.00	3.73	0.975	10.83	1.8
[21]	6.5	-52.50	5.35	0.879	15.2	2.3
[22]	8.0	-24.53	6.41	0.919	16.2	2.0
[23]	9.2	-11.18		失败		
[24]	13.3	-28.70	9.19	0.862	23.8	1.8
[25]	8.5	-21.70	6.84	0.356	16.9	2.0

由表 3 可知, 整体上顶管尺寸越大, 影响范围越大, 但影响范围与顶管尺寸的比值越小, 对于一般尺

寸的顶管(去除尺寸 2.1 m 的案例), 影响范围是 1.4~2.4 倍顶管直径, 沉降槽宽度系数  $i$  为 4~10。文献 [23] 由于拟建场地西高东低, 隧道左右两侧地表受力状态不一致, 横向沉降槽不关于隧道轴线对称, 导致拟合失败。

### 1.2 地表沉降发展规律

在顶管隧道施工过程中, 随着顶管的顶进, 在顶管不同方位的土体会产生不同的响应。郑跃等<sup>[5]</sup>结合实测数据将顶管施工对地表的影响分为四个阶段: 前期波动阶段(距测点较远处, 水和气排出而沉降, 挤压效应而隆起)、隆起阶段(距测点较远处, 挤压隆起)、施工沉降阶段(顶管与土体的间隙、土体应力重分布)、固结沉降阶段(扰动土体固结和次固结变形), 如图 5 所示。张振<sup>[26]</sup>将地层沉降时效性划分为 5 个阶段: 先期沉降、开挖面到达时的沉降、通过时的沉降、尾部通过时沉降、后期固结。

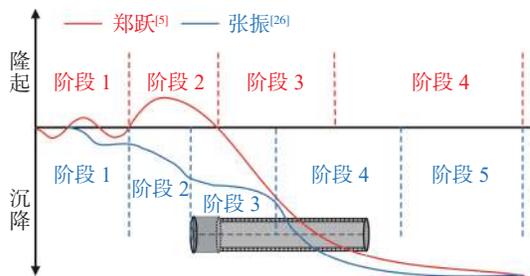


图 5 地表纵向沉降示意图

为了分析实际顶管顶进过程中对地表某点的持续性影响, 对相关顶管隧道数据进行收集, 为了方便对比, 对各工程原始数据进行处理, 横坐标进行归一化, 纵坐标除以最大沉降值, 将处理后的数据绘图, 如图 6 所示<sup>[5,7,21-22,24,27-29]</sup>。可见, 顶管工程实测数据基本可划分为“先隆起后沉降”和“全程沉降”两类, 不同的原因主要是地质条件及施工措施差异, 当顶进压力较小时易出现“全程沉降”、当顶进压力较大时更偏向于“先隆起后沉降”。

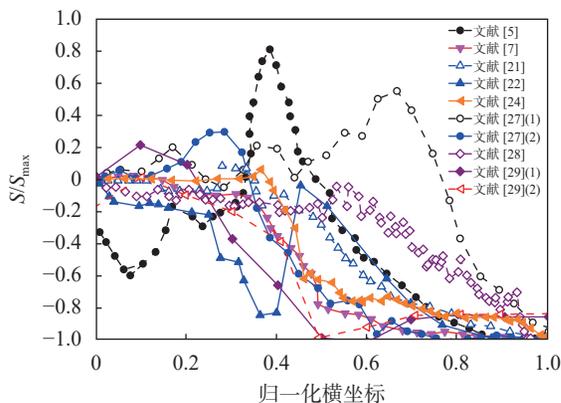


图 6 地表纵向沉降发展相关数据图

## 2 下方既有隧道上浮分析

当新建隧道上穿既有隧道时, 由于管片质量小于开挖土体的质量, 导致既有隧道原有应力平衡受到破坏, 受到卸荷作用, 进而引起既有隧道的上浮, 如图 7 所示。既有隧道上浮量受到多个因素的影响, 主要可以划分为两个方面, 第一方面是卸荷作用的大小, 主要与新建隧道的尺寸、与既有隧道的距离等有关, 第二方面为既有隧道的刚度, 主要与既有隧道结构、既有隧道尺寸等有关。

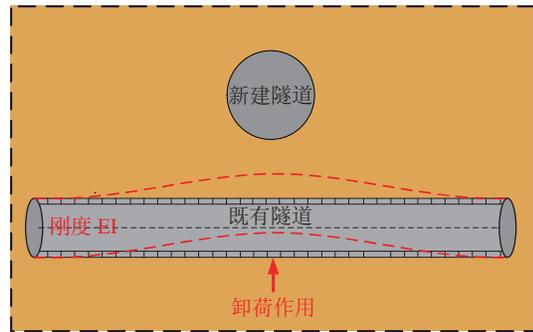


图 7 既有隧道上浮示意图

### 2.1 既有隧道受扰动范围

为了分析新建隧道对下方既有隧道的影响范围, 整理了相关案例的监测数据。为了方便不同案例间的对比, 对原始数据进行处理, 横坐标为距顶管轴线的距离与顶管等效半径的比值, 纵坐标为上浮量与最大上浮量的比值, 将处理后的数据绘图, 如图 8 所示<sup>[6,8,30-31]</sup>, 可见既有隧道上浮规律与地面沉降规律类似, 均是在顶管轴线处变形量最大, 随着距离顶管轴线距离的增加, 变形量逐渐减小。

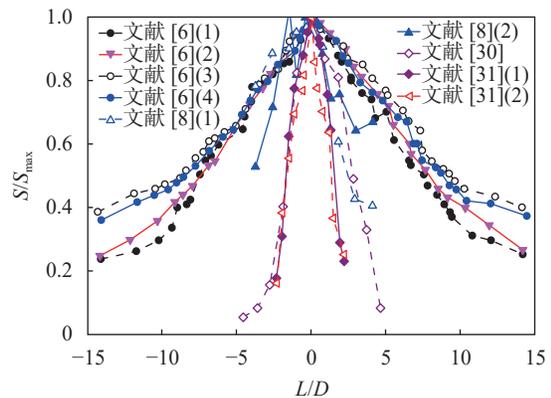


图 8 相关案例隧道上浮数据

对上述案例原始数据利用 Peck 公式进行拟合(见图 9), 可见既有隧道上浮规律呈现出“反向”Peck 曲线, Peck 公式拟合参数见表 4, 其中  $L_0$  为上浮量为 1 mm 的监测点与顶管轴线的距离。可见, 沉降槽宽度系数、 $L_0$ 、 $L_0/D$  均没有明显规律, 这是因为

既有隧道上浮量受新建顶管隧道参数和既有隧道刚度两方面影响,而不同工程既有隧道刚度差别较大,导致上浮影响范围规律不明显。

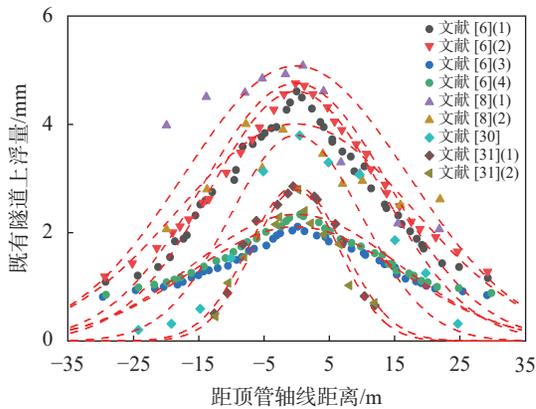


图9 隧道上浮数据拟合图

表4 既有隧道上浮数据 Peck 拟合参数

文献	D/m	S <sub>max</sub> /mm	i/mm	R <sup>2</sup>	L <sub>0</sub> /m	L <sub>0</sub> /D
[6]	2.1	4.61	13.32	0.884	23.2	11.0
	2.1	4.76	14.44	0.901	25.5	12.1
	2.1	2.11	16.28	0.761	19.8	9.4
	2.1	2.34	15.89	0.792	20.7	9.9
[8]	6.1	5.08	17.34	0.376	31.2	5.1
	6.1	4.01	18.18	0.335	30.2	5.0
[30]	6.1	3.80	10.24	0.851	16.7	2.7
[31]	6.2	2.86	7.37	0.974	10.6	1.7
	6.2	2.79	6.74	0.858	9.6	1.5

2.2 上浮量发展规律

收集相关案例不同监测时间的数据,以分析既有隧道固定监测点上上浮量随施工时间的变化规律。同样,为了方便不同工程案例的数据对比,对原始数据进行处理,横坐标为归一化后的监测时间或顶进距离,纵坐标为归一化后的上浮量,如图10所示<sup>[6, 32-33]</sup>。可见,既有隧道上浮量随顶管施工的开展先上升,然后保持相对稳定。

3 案例分析

3.1 工程概况

某长度为42 m的新建地铁出入口I,如图11所示,施工采用土压平衡式矩形顶管机,顶管断面外轮廓尺寸为6.9 m×4.9 m,管片厚度为0.5 m,管节长度为1.5 m。新建顶管隧道底部埋深约8.3 m,上方覆土约3.2~3.4 m,且上穿两条既有地铁隧道,地铁隧道分别位于顶管下方垂直距离1.3 m和1.6 m,既有地铁隧道管片内径为5.4 m,外径为6 m,环宽为1.5 m,顶管与既有隧道位置见图12。

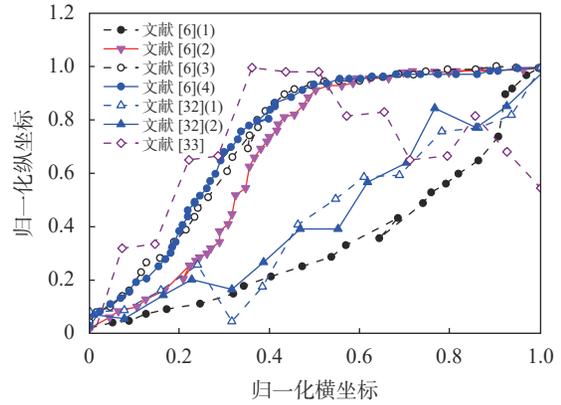


图10 既有隧道上浮量随时间变化

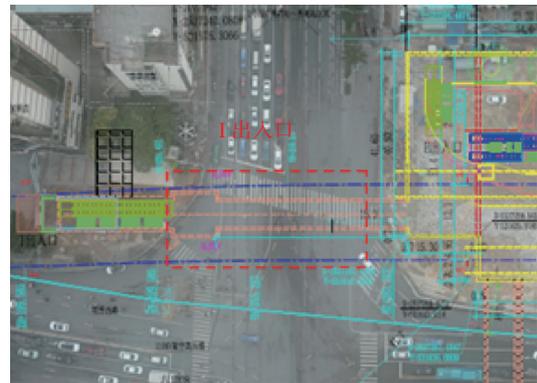


图11 新建顶管工程位置图

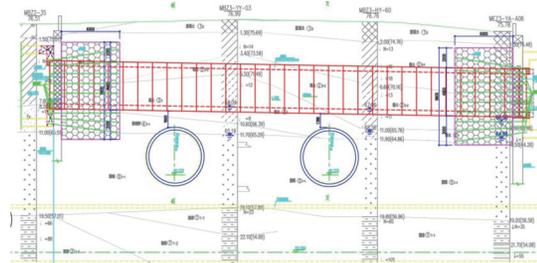


图12 新建顶管工程剖面图

该处地质由上到下分别为:素填土、黏土、粉土、圆砾、泥岩(粉砂质泥岩),各土层物理力学参数见表5。新建顶管隧道上穿黏土和粉土地层,既有地铁隧道下穿粉土和圆砾地层,地铁隧道埋深10.6 m,地下水水位埋深8.5 m。

表5 土层物理力学参数

地层	ρ	w	E <sub>0</sub>	v	φ	c	K <sub>0</sub>	n
素填土	1.96	32	5	0.25	10	15	0.34	0.48
黏土	1.92	27.3	20	0.28	11.5	50	0.37	0.44
粉土	1.97	21.8	10	0.30	25	3	0.43	0.40
圆砾	2.08		25	0.25	35	0	0.33	
泥岩	2.1	17	20	0.35	18	65	0.27	0.01

表中:ρ为天然密度, g/cm<sup>3</sup>; w为天然含水率, %; E<sub>0</sub>为变形模量, MPa; v为泊松比; φ为内摩擦角, (°); c为黏聚力, kPa; K<sub>0</sub>为静止侧压力系数; n为孔隙率。

对于地表监测,在轴线上布设沉降监测点,正常区域 5 m 布置 1 个,同时在轴线走向上布置监测断面,监测断面在轴线左右两侧设点,断面测点间距为 3 m,以便分析顶管推进对地表的影响范围,为绘制完整的沉降槽提供比较完整、合理的数据。

对于隧道变形监测,基准点组选取在施工影响范围外,两端洞身处各布置 4 个基准点,共计 8 个,并牢固地安置观测棱镜。监测点布置在隧道洞身断面上,监测断面由密至疏 3~10 m 布置一个,每个断面均沿隧道洞身环向布设 5 个测点,分别为隧道拱顶 1 个、道床 2 个、收敛 2 个。

### 3.2 扰动控制措施

由于工程位于市区繁华地段,下方又有既有地铁隧道,对变形控制要求较高,为了减小顶管施工对周围环境的影响,采取了下列扰动控制措施。

#### (1) 选择适用于本工程的矩形顶管设备

矩形顶管机刀盘由六个小刀盘组成,如图 13 所示,以保证刀盘无超挖,减小开挖对地层的扰动。矩形顶管机前壳体的外形尺寸为 6.92 m×4.92 m,顶管机前壳体比后壳体单边大 5 mm,后壳体比管节单边大 5 mm,管节与开挖面的单边间隙仅为 10 mm。

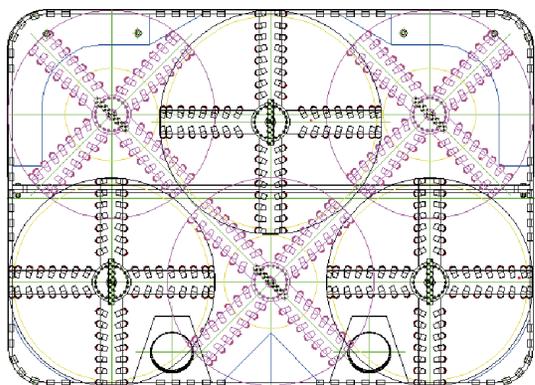


图 13 顶管机刀盘布置图

#### (2) 设置泥垫装置

本工程矩形顶管设备设置了 4 组(8 个)泥垫装置(注泥孔),如图 14 所示,以填充施工过程中泥土的流失,减小地表的塌陷。

#### (3) 多种防“背土”措施

在顶管施工过程中,随着顶程的增加,顶管机受到的摩擦力也逐渐增加,当摩擦力增加到周围土体的临界约束能力后,隧道上方土体将随着管片移动,使得阻力进一步增加,且对周围土体的扰动增大,称为“背土”效应。

在本工程顶管施工过程中,通过在管壁和土体之间注入一层泥浆,使管片和土体之间形成一层均匀

的泥浆膜,降低管-土之间的摩擦,防止“背土”现象的发生。为了达到顶管机及管节注浆的理想效果,在掘进机头处配置了 8 个注浆口,管节处配置了 10 个补浆孔。此外,在矩形顶管机机头设置防背土装置,进一步减弱“背土”效应。

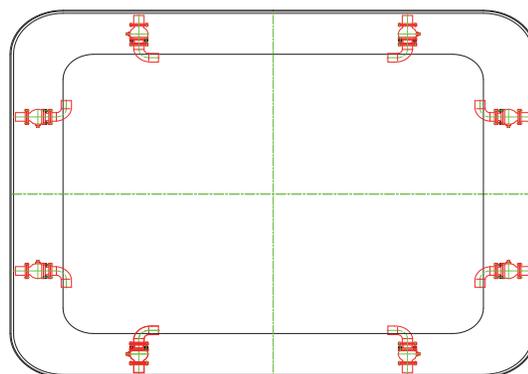


图 14 泥垫装置横剖面图

#### (4) 顶管增设配重

新建顶管隧道与既有地铁隧道最小间距仅 1.3 m,新建隧道管片质量小于未开挖前的土体质量,即既有隧道受到卸荷作用,出现上浮现象。在顶管顶进期间,通过在顶管内增设配重,以抵消土方卸荷作用,减小既有隧道的变形。

#### (5) 顶管施加预应力

在顶管管节预留预应力孔,施工完成后,通过张拉预应力钢筋对管节施加预应力,增加顶管隧道的整体性,以减小上方地表沉降和下方既有隧道上浮。

### 3.3 监测数据分析

#### (1) 地表变形分析

不同监测时间地表断面沉降见图 15,可见地表位移关于顶管轴线对称,在轴线处沉降最大,向两侧逐渐减小,且随着施工的持续,断面位移逐渐增加。利用 Peck 公式对 2022 年 1 月 28 日数据进行拟合,沉降槽宽度系数  $i$  为 4.21,沉降影响范围为 9.2 m (1.40 倍等效外径),与 1.1 节已有监测数据结论较为一致。

顶管轴线监测点随时间变化趋势如图 16 所示,可见各点规律较为一致,均是在顶管机未到达时隆起,在顶管机到达和通过后开始沉降并逐渐趋于稳定,最大沉降约为 11 mm。曲线规律与 1.2 节研究结论一致。

#### (2) 既有隧道变形分析

距顶管轴线不同距离监测截面实测数据(见图 17),本案例整体变形较小,最大上浮量仅 1.6 mm,监测点距顶管轴线距离对上浮值影响不大,这是由于

本案例采用了多种措施(3.2节),减小了施工对周围环境的扰动,可见扰动控制效果较好。

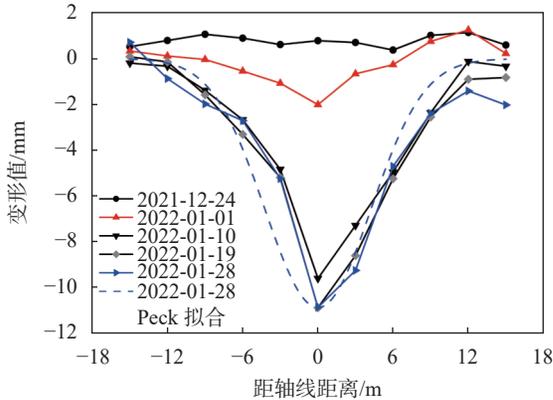


图 15 不同监测时间地表断面沉降

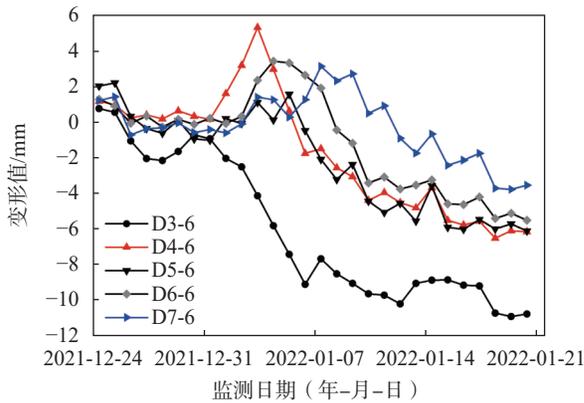


图 16 地表沉降随时间变化

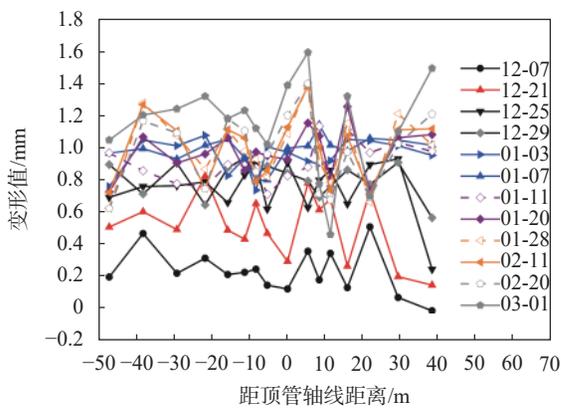


图 17 距顶管轴线不同位置既有地铁上浮变形

既有隧道测点上浮量随时间变化如图 18 所示,变形量先快速增加,然后上浮量趋于相对稳定,这与 2.2 节相关工程数据规律一致。

### 4 结论

通过收集大量顶管工程地表和既有隧道监测数据,对顶管施工过程中地表沉降和既有隧道上浮机理及规律进行分析和归纳,结合上穿既有隧道顶管工程实测数据,对采取多种扰动控制措施的地表沉降和隧

道上浮规律开展进一步分析。主要研究结论如下:

(1)利用 Peck 公式对地表沉降工程数据进行拟合,发现沉降槽宽度系数  $i$  在 4~10 之间(本文 4.21),沉降影响范围约为 1.4~2.6 倍顶管直径(本文 1.40),地表沉降随时间变化呈现“先隆起再沉降”和“全程沉降”两种形式。

(2)既有隧道受到卸荷作用后的上浮值,呈现“反向”Peck 曲线,拟合参数不仅与新建隧道参数有关,还与既有隧道刚度有关,上浮量随时间呈现先增加后稳定的规律。

(3)采用多种扰动控制措施,能够有效减小顶管施工对周围环境的扰动,实测地表最大沉降量约为 11 mm,既有隧道最大上浮值约为 1.6 mm。

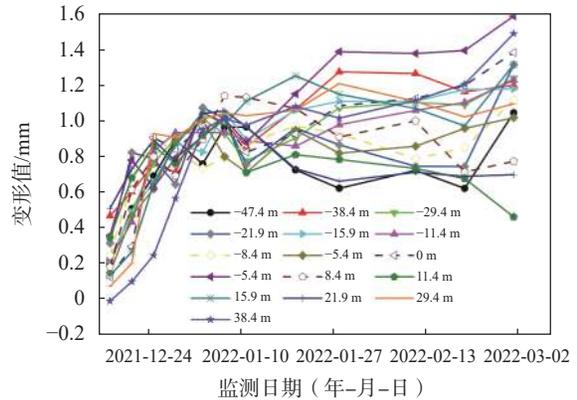


图 18 测点上浮随时间变化

### 参 考 文 献

[ 1 ] 余芳涛,吴征奇,周伟踪,等.考虑关键施工参数的矩形顶管隧道围岩变形控制分析[J].*岩土工程学报*,2022,44(S1):247-253.

[ 2 ] 朱 剑,李振勇,张 泷.复杂环境下大断面矩形顶管法施工过程地表沉降规律及控制措施研究[J].*岩土工程技术*,2017,31(1):49-54.

[ 3 ] 丁传松.大断面矩形顶管下穿合流污水箱涵变形分析[J].*岩土工程技术*,2023,37(1):1-6.

[ 4 ] 魏 纲,徐日庆,屠 玮.顶管施工引起的土体扰动理论分析及试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2004(3):476-482.

[ 5 ] 郑 跃,丁文其,陈立生.受顶管施工影响的土体扰动分析与实测研究[J].*地下空间与工程学报*,2010,6(5):1015-1020.

[ 6 ] 刘浩航.顶管上穿施工对既有地铁隧道的影响分析[D].湘潭:湘潭大学,2014.

[ 7 ] 李明宇,王 松,张维熙,等.大断面矩形顶管隧道施工引起的地面沉降分析[J].*铁道建筑*,2019,59(5):81-84.

[ 8 ] 吴垠龙,刘 维,贾鹏蛟,等.矩形顶管近距离上穿既有

- 隧道施工扰动分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(6): 1968-1978.
- [9] 徐新, 付江山, 吴晓斌, 等. 矩形顶管施工引起的地表沉降研究[J]. 公路工程, 2017, 42(4): 4-9.
- [10] 魏纲, 吴华君, 陈春来. 顶管施工中土体损失引起的沉降预测[J]. 岩土力学, 2007(2): 359-363.
- [11] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//7th International Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering. Mexico City, 1969: 225-290.
- [12] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures[M]. Glasgow: lackie, 1986: 10-50.
- [13] FANG Y S, LIN L S J, LIN L J S. Time and settlement in EPB shield tunnelling[J]. Tunnels & Tunnelling, 1993, 25(11): 27-28.
- [14] 方从启, 王承德. 顶管施工中的地面沉降及其估算[J]. 江苏理工大学学报, 1998(4): 108-112.
- [15] 房莹光, 莫海鸿, 张传英. 顶管施工扰动区土体变形的理论与实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(4): 601-605.
- [16] 姜忻良, 赵志民, 李园. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004(10): 1542-1544.
- [17] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction[M]. 1982.
- [18] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. Geotechnique, 1993, 43(2): 315-320.
- [19] 韩焯, 罗文林, 李宁. 地铁隧道施工引起沉降槽宽度的影响因素[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1188-1193,1219.
- [20] JONES B D. Low-volume-loss tunnelling for London ring main extension[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2010, 163(3): 167-185.
- [21] 董俊. 地铁过街通道矩形顶管施工变形监测分析[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(8): 106-110.
- [22] 郑知斌, 李名淦, 闫朝涛, 等. 北京首条矩形顶管风险控制设计与沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1281-1290.
- [23] 赵玉权. 深圳地铁10号线大断面矩形顶管施工技术控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [24] 王发民, 孟庆军, 张浩, 等. 浅埋富水地层特大断面矩形顶管隧道掘进参数分析[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(2): 316-326.
- [25] 王蕴晨. 并行超大浅埋矩形顶管力学特性研究及工程应用[D]. 福州: 福建工程学院, 2020.
- [26] 张振. 超大矩形断面顶管隧洞开挖引起的地表沉降研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [27] 陈杰. 四孔并行矩形顶管施工力学效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [28] 郑斌. 大断面类矩形顶管壳体土压及顶进阻力分析——以上海淞沪路—三门路下立交工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(10): 1740-1747.
- [29] 韩占波, 豆小天, 曹伟明, 等. 浅覆土小间距矩形顶管施工地表变形控制技术[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(3): 496-503.
- [30] 叶耀东. 大断面矩形顶管近距离上穿地铁隧道变形控制探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2015(7): 19,203-205.
- [31] 张志伟, 梁荣柱, 高坤, 等. 考虑管片环间接头弱化的新建隧道上穿引起既有盾构隧道纵向变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2955-2970.
- [32] 李志南, 潘珂, 王位赢. 并行顶管近距离上穿既有盾构隧道的安全分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S2): 939-944,975.
- [33] 石雷, 吴宇, 殷茜东. 矩形顶管上穿运营隧道的施工参数控制分析[J]. 工程建设, 2020, 52(7): 50-53.

收稿日期: 2023-09-18