

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.03.013

# 浅覆土矩形顶管下穿机场高速 地表变形规律研究

郑鹏程<sup>1</sup>, 黄家豪<sup>2</sup>, 刘 维<sup>2</sup>, 黄雪梅<sup>1</sup>, 刘 昊<sup>1</sup>, 赵冬梅<sup>1</sup>

(1. 北京住总集团有限责任公司, 北京 100101; 2. 苏州大学轨道交通学院, 江苏苏州 215000)

**摘要:** 针对浅埋矩形顶管下穿重要风险源问题, 以北京地铁 12 号线三元桥站地下通道矩形顶管近距离下穿高速公路工程为背景, 采用数值模拟对高速路路基路面结构层进行精细化建模, 并模拟下穿施工全过程; 分析矩形顶管下穿高速路的地表变形规律, 并对顶管施工中机头支护压力、地层损失、注浆压力等施工参数进行敏感性分析; 最后采用视频监控对高速路沉降进行监测及验证。结果表明: 浅埋矩形顶管施工引起的地表变形规律可以概括为地表轻微隆起、地表迅速沉降和沉降最终稳定 3 个阶段; 地层损失和注浆压力变化对沉降量的变化最为敏感; 由现场视频监控数据可知, 建立的数值模型能够反映顶管施工对地表变形的基本规律, 高速路面最大沉降满足  $\leq 15$  mm 的控制标准。

**关键词:** 城市轨道交通; 矩形顶管; 数值模拟; 精细化三维建模; 地表变形; 现场视频监控

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)03-0091-09

## Surface Settlement Induced by Jacked Box Tunnel with Shallow Overburden

ZHENG Pengcheng<sup>1</sup>, HUANG Jiahao<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, HUANG Xuemei<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, ZHAO Dongmei<sup>1</sup>

(1. Beijing Uni-Construction Group Co., Ltd., Beijing 100101;

2. School of Rail Transportation, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215000)

**Abstract:** Addressing the challenge of shallow-buried box tunnel machine passing under significant risk sources, this study takes the close-range underpass of the expressway by the underground passage box tunnel machine at Sanyuanqiao Station of Beijing Subway Line 12 as the background. Numerical simulation was used to precisely model the roadbed pavement structure layer of the expressway and simulate the entire construction process of the underpass. The ground surface deformation patterns caused by the box tunnel machine under the expressway were analyzed, and a parameter sensitivity analysis was conducted on construction parameters such as the support pressure at the pipe head, ground loss, and grouting pressure during the pipe jacking construction. Finally, video monitoring was used to monitor and verify the settlement of the expressway. The results show that the ground surface deformation caused by shallow-buried box tunnel machine can be summarized into three stages: slight surface uplift, rapid surface settlement, and final settlement stabilization. Changes in ground loss and grouting pressure are the most sensitive to settlement variation. The established numerical model can reflect the basic patterns of surface deformation caused by pipe jacking construction, as indicated by on-site video monitoring data. The maximum settlement of the highway surface meets the control standard of  $\leq 15$  mm.

收稿日期: 2024-07-10 修回日期: 2024-10-17

第一作者: 郑鹏程, 男, 本科, 高级工程师, 从事地铁工程施工管理工作, goodluckzpc@163.com

通信作者: 刘维, 男, 博士, 教授, 从事土力学和地下工程的教学和科研工作, ggoulimmeng@suda.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978430); 江苏省基础 Research 计划(BK20231318)

引用格式: 郑鹏程, 黄家豪, 刘维, 等. 浅覆土矩形顶管下穿机场高速地表变形规律研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(3): 91-99.

ZHENG Pengcheng, HUANG Jiahao, LIU Wei, et al. Surface settlement induced by jacked box tunnel with shallow overburden[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(3): 91-99.

**Keywords:** urban rail transit; box tunnel; numerical simulation; fine 3D modeling; ground surface settlement; on-site video monitoring

矩形顶管以其断面利用率高、施工效率高、不影响城市交通等特点，在城市主要干道、地下人行通道、地铁、综合管廊等项目中得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。顶管穿越区域多位于重要道路和地铁隧道等重点地段，其产生的地层变形必然对周边建筑产生复杂影响<sup>[4]</sup>。为此，开展此类顶管施工过程中地层变形规律的研究，对于提升其在城区复杂环境下的适应能力具有重要的现实意义。

目前，关于矩形顶管施工对周边环境的影响已有大量研究。理论解析方面：ZHOU 等<sup>[5]</sup>基于随机介质理论和修正 Verruijt 解，建立矩形顶管施工地面沉降预测模型；许有俊等<sup>[6]</sup>运用 Mindlin 弹性理论解、随机介质理论及分层总和法，系统地研究了矩形顶管施工扰动引起的地表沉降变形特性；韩仲慧等<sup>[7]</sup>对 Peck 公式进行了改进，相比于传统的 Peck 公式可以更准确地描述矩形顶管施工引起的地表变形规律；张志伟等<sup>[8]</sup>推导得到矩形顶管掘进期间地表隆沉位移解析解，经与实测结果进行对比分析，发现所提方法可预测矩形顶管在软土地层掘进引起的地表隆沉变形规律。数值模拟方面：邓婷等<sup>[9]</sup>以小应变刚度粒子间应变本构关系为基础，利用数值模拟软件研究软黏土地层中矩形顶管施工时的地层变形；郭延辉等<sup>[10]</sup>以楚雄—攀枝花天然气管道穿越高速工程为例，采用数值模拟方法，研究顶管施工过程中顶管结构、管涵围岩和高速公路路基路面的变形规律与力学特性；张文瀚等<sup>[11]</sup>以杭一甬高速公路顶管为研究对象，采用数值模拟方法，研究顶管顶进过程中机头支护压力、地层损失、注浆状态等因素对路基变形的影响，并提出减小其变形的办法。现场实测方面：SHEN 等<sup>[12]</sup>和 SUN 等<sup>[13]</sup>通过监测顶管施工中的地表沉降、地层横向位移、超孔隙水压力和土压力，总结环境影响和施工参数之间的关系；程伟峰等<sup>[14]</sup>对矩形顶管下穿高速公路引起的地表变形进行全周期的监测，对施工过程中不同位置、不同施工阶段的观测资料进行统计和分析；银英姿等<sup>[15]</sup>依托内蒙古理工大学地下过街通道工程，整理分析实测路基变形数据，对砂土地层顶管施工过程中路基沉降规律及影响范围进行初步研究。

以北京地铁 12 号线三元桥站地下通道矩形顶管近

距离下穿高速路为背景，采用数值模拟软件对高速公路路基路面结构层进行精细化建模，模拟矩形顶管下穿高速公路施工的全过程，分析矩形顶管施工对高速公路路面变形的影响规律，并对支护压力、地层损失、注浆压力等因素对地表变形影响进行参数敏感性分析，最后结合现场视频监测结果对数值模型进行验证，为工程施工及类似工程提供参考。

## 1 工程概况

如图 1 所示，本文研究范围为换乘厅至 E1 出入口顶管工程，该段隧道下穿首都机场高速公路，路宽为 33.6 m，路基路面结构层厚度 83 cm。隧道长度为 40.528 m，坡度为 2.37%，顶部埋深为 3.8~4.8 m。

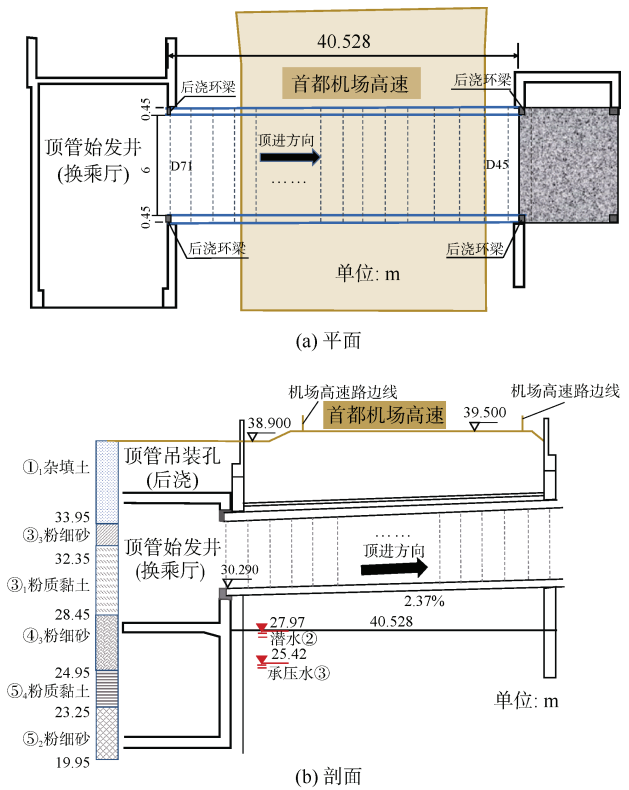


图 1 顶管工程平面及剖面

Figure 1 Plan and Profile of Pipe Jacking Project

项目场地范围内，顶管通道自上而下主要穿越杂填土①<sub>1</sub>层、粉细砂③<sub>3</sub>层、粉质黏土③<sub>1</sub>层、粉细砂④<sub>3</sub>层、粉质黏土⑤<sub>4</sub>层、粉细砂⑤<sub>2</sub>层，相关土层物理力学性质参数如表 1 所示。

表1 土层物理力学性质参数

Table 1 Physical and Mechanical Properties Parameters of Soil Layers

土层	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	压缩模 量/MPa	黏聚力/ kPa	摩擦 角/(°)	泊松 比
① <sub>1</sub> 杂填土	18.0	—	2	10	—
③ <sub>3</sub> 粉细砂	20.1	10~20	0	28	0.30
③ <sub>1</sub> 粉质黏土	20.2	6.45	29.01	14.65	0.30
④ <sub>3</sub> 粉细砂	20.2	15~25	0	30	0.26
⑤ <sub>4</sub> 粉质黏土	20.5	20~30	0	34	0.20
⑤ <sub>2</sub> 粉细砂	20.4	30	10	32	0.26

通道施工采用土压平衡顶管机。该机长 5.234 m, 开挖断面尺寸为 6.94 m×4.92 m。顶管施工主顶系统配置 200 t 油缸 16 个, 总推力 3 200 t; 顶进管节为 27 环, 选用长 1.5 m、厚度为 0.45 m 的钢筋混凝土预制管节, 尺寸为 6.9 m×4.9 m, 管节混凝土强度等级为 C50, 顶管机及管节如图 2 所示。土舱压力值是顶进施工的主控参数, 根据计算, 本工程土舱压力理论设置范围为 0.06~0.08 MPa。土舱内土体改良使用膨润土浆液, 配合比如下: 膨润土 98 kg、黏土 392 kg、水 812 kg、高分子聚合物 0.5~1 kg。管外触变泥浆的配比通常为水:膨润土=(4~5):1, 膨润土:掺合剂=(20~30):1, 水:膨润土:纯碱:羧甲基纤维素(CMC)=400:100:20:20。顶管始发井端头需对土体进行注浆加固。

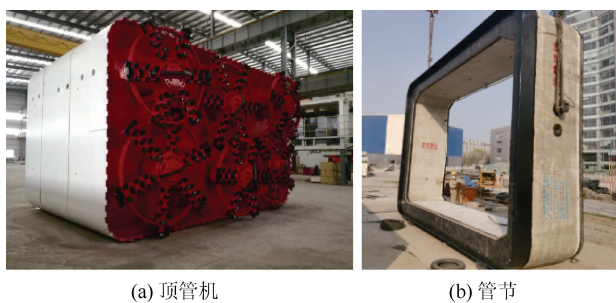


图2 顶管机及管节

Figure 2 Pipe jacking machine and pipe section

顶管顶进过程中各推进参数依表 2 取值, 实际推进过程中应根据试验段推进情况及各监测数据的反馈及时调整推进参数。

## 2 顶管施工三维数值模拟计算与分析

### 2.1 三维数值模型

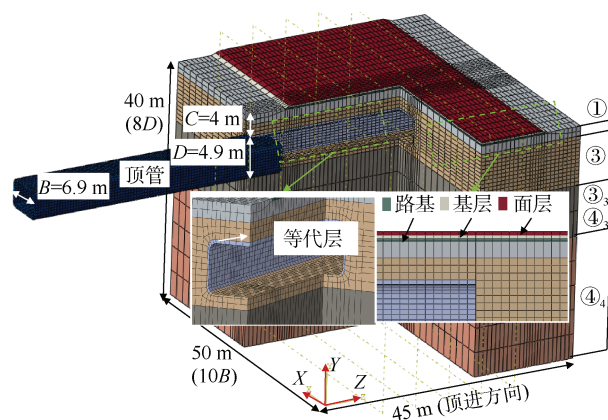
本文采用有限元分析软件 ABAQUS 建立矩形顶管下穿机场高速的三维模型, 如图 3 所示。模型尺寸为

45 m(长)×50 m(宽)×40 m(高), 共划分 73 222 个节点, 68 330 个单元。

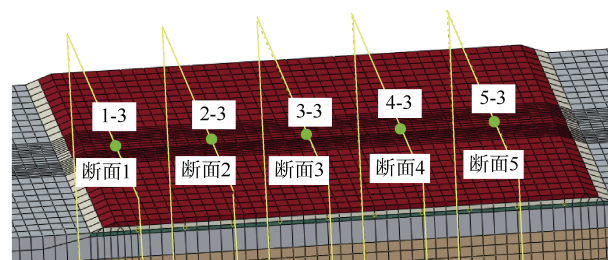
表2 顶管顶进参数

Table 2 Pipe Jacking Advancement Parameters

施工参数	控制指标
土舱压力/MPa	0.06~0.08
推进速度/(mm/min)	0~20
出土量/m <sup>3</sup>	51~53
注浆量/m <sup>3</sup>	2.01
注浆压力/MPa	0.15



(a) 模型尺寸及有限元网格



(b) 监测断面

图3 顶管三维数值建模

Figure 3 Three-Dimensional Numerical Modeling of Pipe Jacking

土体的属性假定是各项同性、连续且各部分保持均匀, 所以采用实体单元(C3D8R)进行模拟, 本工程所在场地土层为粉土和粉砂, 而 Mohr-Coulomb 塑性模型主要用于单调荷载下颗粒状材料, 因此土体采用 Mohr-Coulomb 塑性模型, 因结构未进入地下水, 土体建模采用总应力法进行分析。

顶管管片也为各项同性且连续均匀的理想材料。在模拟过程中采用实体单元(C3D8R)进行模拟, 用控制周围土体的位移来模拟顶管机机头的支撑作用。

目前已有的数值模拟工作提供了基本的模拟思路, 但未能对受影响的高速路进行精细化建模, 文中

的高速公路采用实体单元(C3D8R)进行模拟,路面总厚度为 0.83 m,其中面层为 0.3 m 厚沥青混凝土,基层为 0.3 m 厚水泥稳定碎石,路基为 0.23 m 厚粉质砂土。其中路基和基层采用 Mohr-Coulomb 塑性模型,面层采用弹性模型,详细计算参数如表 3 所示。

表 3 材料参数  
Table 3 Material parameters

结构	本构关系	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/(°)
管片	弹性	25	34 500	0.20	—	—
路基	摩尔-库伦	18	50	0.35	5	10
基层	摩尔-库伦	22	1 100	0.25	250	40
面层	弹性	24	1 300	0.25	—	—
等代层	弹性	19.5	3	0.30	—	—

顶管顶进始发面为  $xoy$  平面,模型上表面不设边界条件,不限制任何方向位移;模型四周四个面限制其法向位移,底面限制其水平和竖直两个方向位移,位移边界条件如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_x|_{x=0}=0, u_x|_{x=50}=0; \\ u_z|_{z=0}=0, u_z|_{z=45}=0; \\ u_x|_{y=0}=0, u_y|_{y=0}=0; u_z|_{y=0}=0; \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $u_x|_{x=0}$  为  $x=0$  m 平面的  $x$  方向位移,  $u_x|_{x=50}$  为  $x=50$  m 平面的  $x$  方向位移;  $u_z|_{z=0}$  为  $z=0$  m 平面的  $z$  方向位移,  $u_z|_{z=45}$  为  $z=45$  m 平面的  $z$  方向位移,  $u_x|_{y=0}$  为  $y=0$  m 平面的  $x$  方向位移,  $u_y|_{y=0}$  为  $y=0$  m 平面的  $y$  方向位移,  $u_z|_{y=0}$  为  $y=0$  m 平面的  $z$  方向位移。

土体挖去后,在开挖面上施加大小为  $\sigma_t$  的支护压力;顶管向前顶进一节后,在管节外表面与土体内表面施加大小为  $\sigma_g$  的注浆压力;针对管土之间的空隙,本文在地层损失空隙位置建立一定厚度的三维实体注浆层(等代层),即泥浆和土层混合层,为各项同性且连续均匀的理想材料。等代层厚度  $\delta$  按断面设计尺寸进行计算和选取。模拟过程中使用场变量使材料的弹性模量降低至 3 MPa。

## 2.2 顶管施工模拟过程

本模型共顶进 15 步,每次顶进 3 m,模拟步骤如下:①进行自重应力平衡计算,得到初始状态的应力场;②利用生死单元法模拟土体开挖,每次开挖长度 3 m;③利用位移控制法,在整个管节上施加  $z$  方向位移,距离为管节纵向长度;顶管与土体之间的相互作用采用主-从面接触来实现,以顶管周围土体为主面,

顶管外部面为从面,接触形式采用法向硬接触,切向罚函数;④重复步骤②~③直至顶管顶进贯通。具体设置如图 4 所示。

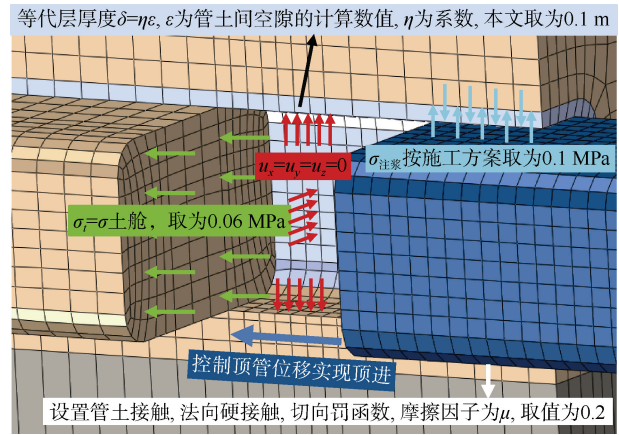


图 4 数值模拟具体设置

Figure 4 Specific Settings for Numerical Simulation

## 2.3 结果分析

### 2.3.1 顶管上方距开挖面不同距离路面变形分析

图 5 为顶管穿越高速路过程中顶管机开挖到不同位置的土层沉降计算云图。

在顶管正上方等距布置 5 个断面(见图 3(b)),图 6 为顶管中轴线正上方结点在顶管穿越高速路整个过程中的沉降变化(结点位置见图 3)。顶管施工是一种动态的过程,顶管正上方结点的位移随顶管机头的推进而不断改变。从图 6 可以看到,当顶管到达结点所在断面前,由于支护压力、注浆压力和土的摩擦作用,使路基前方产生了一定的隆起,随后在顶管施工过程中,这个结点的变形由隆起转变为下沉,当开挖面刚好经过这个结点所在断面时,其沉降速度最快,主要是因为顶管机与管节的尺寸不完全相同,导致管节与周围土层之间产生了超挖空隙,土的自重使土填充因超挖而产生的空隙,且新注入的浆液压缩模量仍然偏小,致使周边土向空隙接近。当掌子面离开结点所在断面一段距离后,地面沉降逐渐变得平缓。各点的沉降量最大值发生在顶管机头离开测点水平距离约  $2.5D \sim 3D$  以上( $D$  为顶管高度),并趋于平稳。

### 2.3.2 地表沉降横向分布规律

由以上分析可以看出,高速公路在顶进期间,其变形呈现出先抬升、后下沉、最终稳定的特点,不同断面的横向变化规律都相似,所以只需根据断面 3 的地面沉降数据分析沉降横向分布规律。图 7 是断面 3

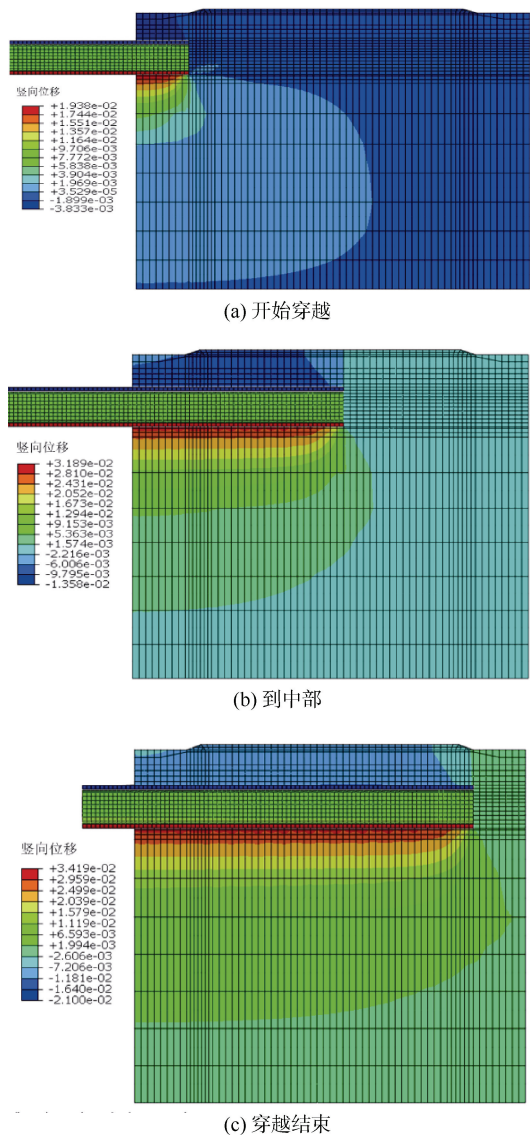


图5 顶管穿越高速路的地层沉降变形云图(单位: m)

Figure 5 Contour map of ground settlement deformation (unit: m)

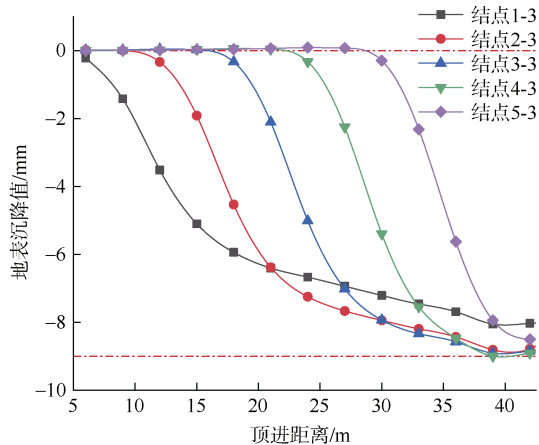


图6 顶管中轴线上方结点竖向变形规律

Figure 6 Vertical deformation pattern

在顶管穿越高速路过程中的地表沉降变形规律( $D_p$ 表示开挖面距测点的水平距离)。

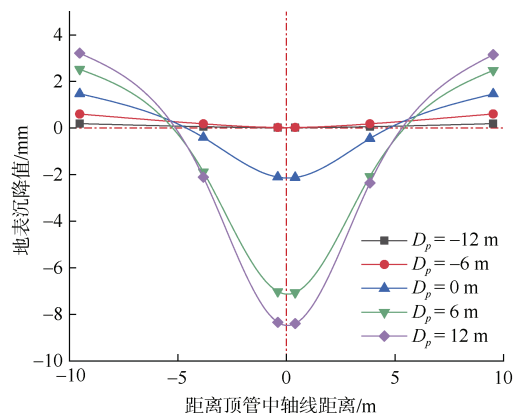


图7 断面3地表沉降变形规律

Figure 7 Surface settlement deformation pattern

由图7可以看到,沿隧道轴线方向的地面沉降最大,离隧道轴线5.6 m之外,地面沉降基本不变。结果表明,该模型的计算结果与Peck公式及有关文献中的数值计算结果吻合,且其影响范围约为 $1.6B$  ( $B$ 为顶管宽度)。

### 2.3.3 视频监测结果验证

图8为监测点1-3(与图3节点1-3对应)、2-3(与图3节点4-3对应)在顶管穿越高速路过程中的竖向位移变化,从图中可以明显看出,测点的竖向变形规律与图6的规律是一致的。

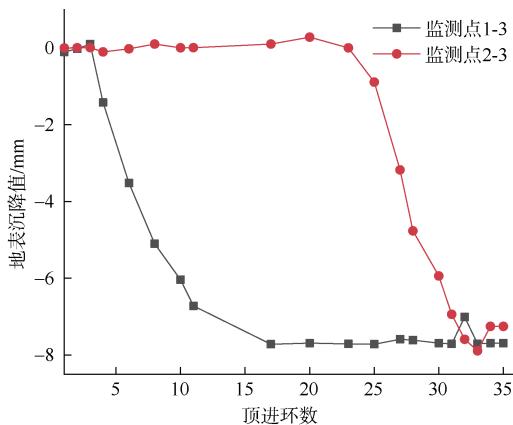


图8 监测点1-3、2-3竖向变形规律

Figure 8 Vertical deformation pattern

图9为监测断面1模拟沉降值与实测值对比。数值模拟及实测对应地表最大变形均出现在顶管中轴线上方(无顶管中轴线上方的监测数据,最大变形由画图软件拟合得出),有限元模拟数据与实测数据相差较小,沉降曲线形态基本一致,建立的数值模型可以较

好地反映出顶管施工引起的地层扰动。现场监测值略大于模拟值的原因可能是车站周围附属结构换乘通道 D 段、E 段的施工及实际地层土体参数并不均匀。

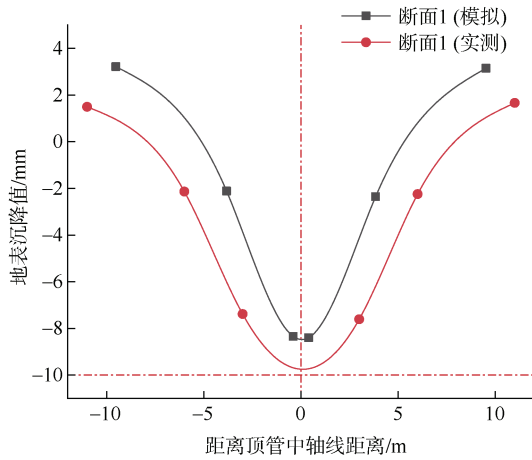


图 9 监测断面 1 模拟沉降值与监测值对比

Figure 9 Comparison between simulated settlement values and monitored values

## 2.4 顶进参数变化对地表变形规律影响分析

### 2.4.1 支护压力变化对地表变形的规律分析

支护压力过大或过小会使前方土体达到极限平衡状态，土体产生破坏，支护压力  $\sigma_t$  分别设为 60、150、240 kPa 进行计算，其他参数不变，地表沉降变形计算结果如图 10、图 11 所示。

从图 10 可以看出，随着支护压力的增大，在顶管推进过程中前方的隆起及穿越后沉降的发展均有增大趋势。从图 11 可以得出，支护压力的改变对沉降槽宽度的影响不大。

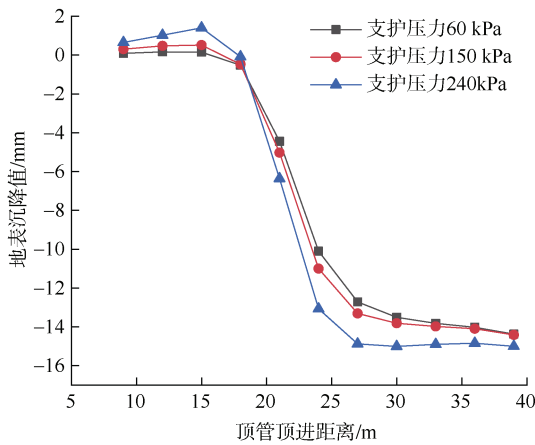


图 10 不同支护压力下断面 3 中间点地表沉降变形规律

Figure 10 Surface settlement deformation pattern under different support pressures

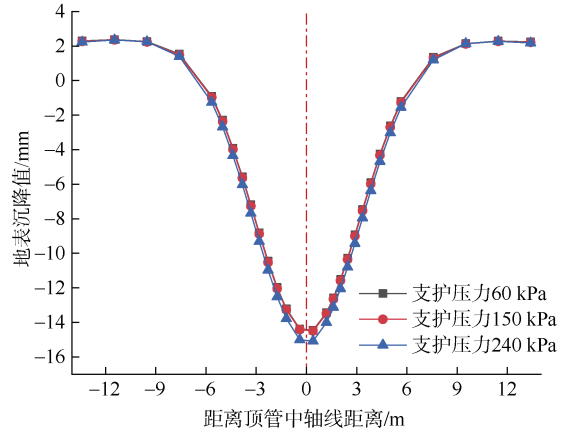


图 11 不同支护压力下断面 3 沉降变形规律

Figure 11 Settlement deformation pattern under different support pressures

### 2.4.2 地层损失变化对地表变形的规律分析

将环向空隙，也就是模型中的等代层厚度  $\delta$  设为 10、20、30 cm，用于模拟地层损失的变化，地表沉降变形计算结果如图 12、图 13 所示。如图 12 所示，开挖面前的隆起量随厚度的增加没有明显的改变，而顶管通过后的地面沉降量则明显增加。如图 13 所示，随着等代层厚度的增加，横断面沉降值也呈增加趋势，因此，地层损失的变化对顶管穿越后的地表沉降有很大影响。

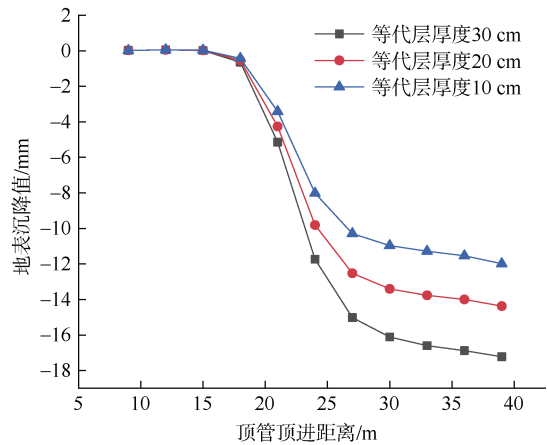


图 12 不同地层损失下断面 3 中间点地表沉降变形规律

Figure 12 Surface settlement deformation pattern under different soil losses

### 2.4.3 注浆压力变化对地表变形的规律分析

为研究注浆压力对顶管施工引起的土体变形影响，分别以  $\sigma_g$  为 30、45、60、75、90 kPa 进行模拟，地表沉降变形计算结果如图 14、图 15 所示。

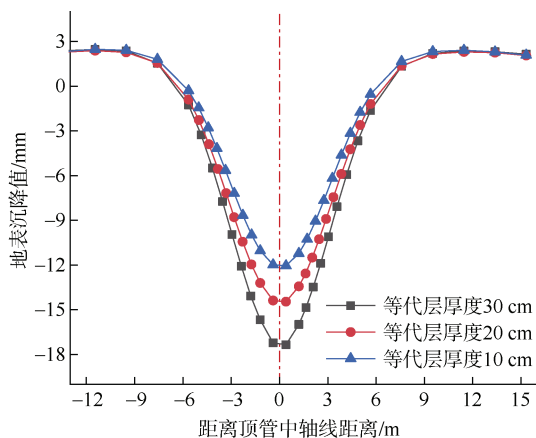


图 13 不同地层损失下断面 3 沉降变形规律  
Figure 13 Settlement deformation pattern under different soil losses

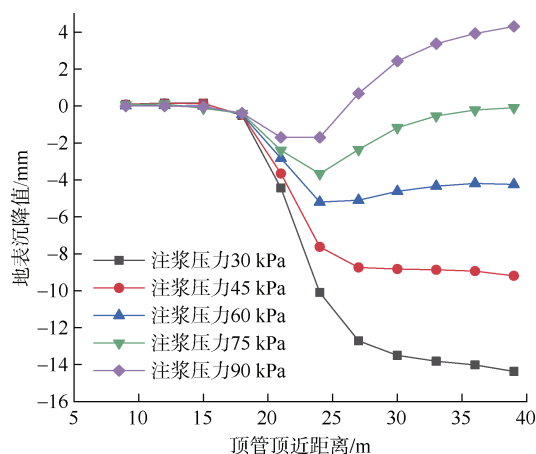


图 14 不同注浆压力下断面 3 中间点地表沉降变形规律  
Figure 14 Surface settlement deformation pattern under different grouting pressures

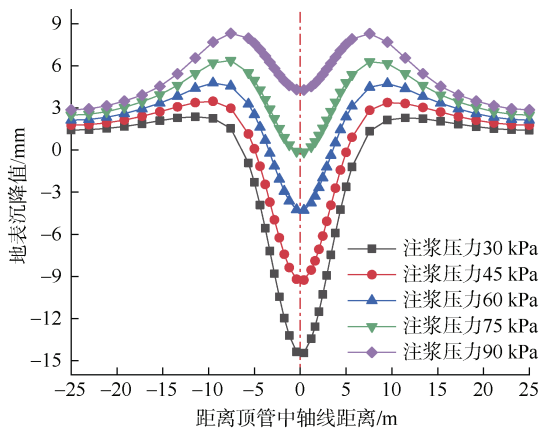


图 15 不同注浆压力下断面 3 沉降变形规律  
Figure 15 Settlement deformation pattern under different grouting pressures

如图 14 所示,开挖面前方的土体沉降值随注浆压力的增加而没有明显改变,而顶管通过后的地面沉降则明显降低。如图 15 所示,随着中注浆压力的增大,横断面沉降值也呈减小趋势,且变化较大,说明地表最大沉降对注浆压力十分敏感。如果黏质粉土砂土地层上覆土厚度为 3~5 m 的情况下进行矩形顶管施工,建议注浆压力保持在 0.045~0.075 MPa,此时既能有效减小土体沉降,又不会造成过大的隆起。

### 3 基于摄影测量的现场监测研究

#### 3.1 AI 视觉自动化沉降监测技术原理

目前已有的现场监测工作大多采用人工监测,存在人工成本高、监测结果不精准、不连续的问题。本方案采用基于摄影测量法的位移监测技术,通过计算监测点与基准点在同一个 CMOS 传感器上成像的像素坐标差的变化,反映被测物体点的位移情况,是一种非接触式的高精度长期位移监测解决方案。本方案通过“亚像素算法”,弥补相机分辨率的不足,使得像素精度提升了近百倍。系统工作时,包括观测站、监测点和参考点。观测站即传感器本身,监测点标靶与参考点标靶在同一个画面成像,计算监测点与参考点的相对像素关系如图 16 所示。

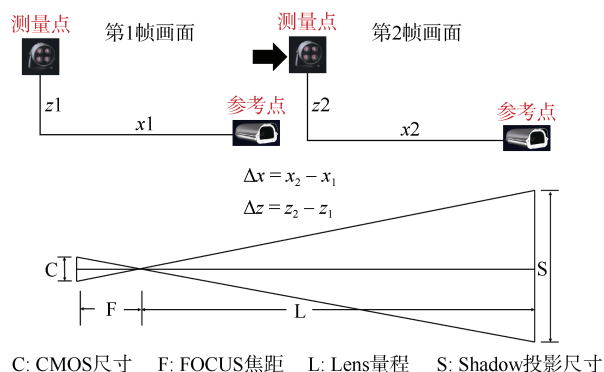


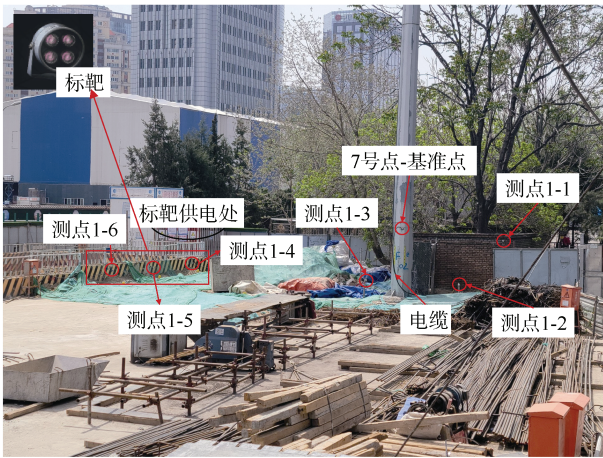
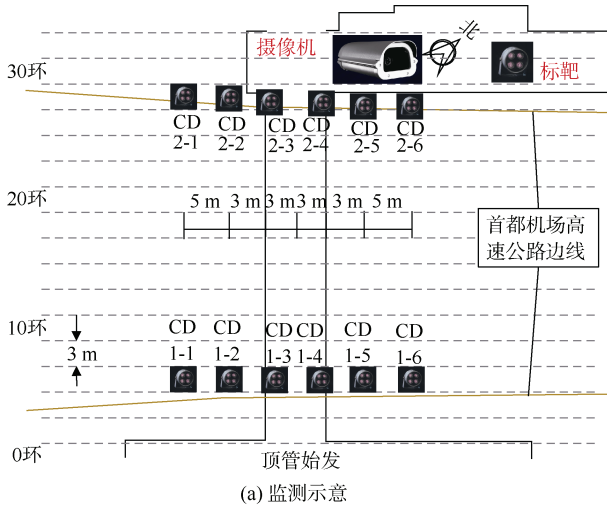
图 16 测量原理

Figure 16 Measurement principles

#### 3.2 监测方案

地面沉降监测点平面布置如图 17 所示。顶管始发、接收洞门处布置一排测点,每个横断面布置 6 个测点,依据近密远疏的原则布置,最外侧位于结构外沿不小于 1 倍埋深。

现场视频监测主要监测地表沉降,监测流程为将 7 号点标定为基准点,程序自动 24 h 监测 1-1、1-2、1-3、1-4、1-5、1-6 各点相对于 7 号点的沉降位移量。



(a) 监测示意  
(b) 监测现场  
图 17 地面沉降监测点平面布置  
Figure 17 Monitoring point layout plan

### 3.3 监测结果

测点 1-3 在顶管穿越高速路过程中的竖向位移变化见图 8。高速路监测断面 1 地表沉降如图 18 所示。

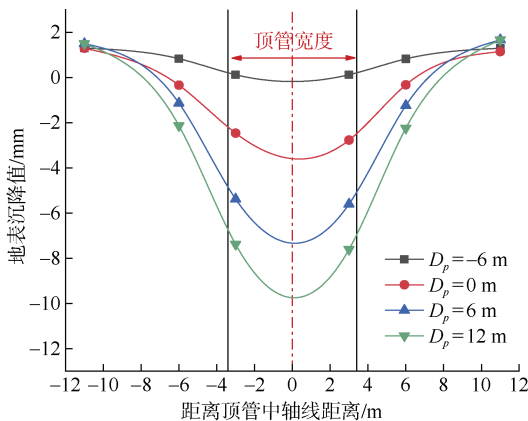


图 18 监测断面 1 地表沉降变形规律  
Figure 18 Surface settlement deformation pattern

从图中可以明显看出监测断面 1 的沉降槽规律与图 7 的规律一致。结果表明：在顶管机通过测点前，地表出现了小于 1 mm 的平缓隆起；当顶管机通过测点时，开始出现连续沉降。顶管机掌子面超过监测断面约 12 m 时，测点 1-3 最大沉降为 7.72 mm。

## 4 结论

本文基于 ABAQUS 三维数值模拟研究矩形顶管顶进施工对上覆机场高速的影响，结合北京地铁 12 号线三元桥站顶管工程实测数据，对模型进行了验证，并利用数值模型探讨了顶管施工中机头支护压力、地层损失、注浆压力等施工参数对高速路路基变形的敏感性。主要结论如下。

1) 浅埋矩形顶管施工引起的地表变形规律可以概括为地表轻微隆起、地表迅速沉降和沉降最终稳定 3 个阶段。掌子面距离测点约 5 m 时，隆起达到最大值。掌子面通过测点后，沉降迅速增大直至最终稳定。

2) 各测点的沉降量最大值发生在顶管机头离开测点水平距离  $2.5D \sim 3D$  以上 ( $D$  为顶管高度)；矩形顶管施工引起的沉降槽其分布曲线类似正态分布，这与 Peck 公式基本一致，垂直于顶管穿越方向的影响范围在  $1.6B$  左右 ( $B$  为顶管宽度)。

3) 在一定范围内，顶管施工中支护压力、地层损失及注浆压力等敏感因素对地表沉降值的变化均有一定影响，但基本趋势和分布情况不变，其中地层损失和注浆压力的变化对沉降量的变化最为敏感。

4) 由现场视频监控数据可知，建立的数值模型能够反映顶管施工对地表变形的基本规律。高速路路面最大沉降满足  $\leq 15$  mm 的控制标准。应利用好现场视频监控的 24 h 监测数据，密切关注由于接头漏浆、局部超欠挖、纠偏等因素导致的地表变形，动态调整顶管机的土舱压力、顶进速度、同步注浆量等掘进参数。

## 参考文献

[1] 郑永光, 薛广记, 陈金波, 等. 我国异形掘进机技术发展、应用及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(6): 1066-1078.  
ZHENG Yongguang, XUE Guangji, CHEN Jinbo, et al. Development, application and prospect of technology of special-shaped boring machine in China[J]. Tunnel construction, 2018, 38(6): 1066-1078.  
[2] 俞森, 刘维, 史培新, 等. 浅埋大断面矩形顶管掘进面

- 稳定性及支护压力分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 612-620.
- YU Miao, LIU Wei, SHI Peixin, et al. Analysis of stability and support pressure of driving face in shallow buried rectangular pipe jacking with large section[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(5): 612-620.
- [3] 吴根龙, 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.
- WU Yinlong, LIU Wei, JIA Pengjiao, et al. Construction disturbance analysis of jacked box tunneling overcrossing existing tunnel at short distance[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2022, 18(6): 1968-1978.
- [4] 吴勇. 矩形顶管施工的环境效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- WU Yong. Research of Environmental Influence Induced by Construction of Rectangular Pipe-jacking[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [5] ZHOU Xiaoqi, SHI Peixin, XU Xiangyang, et al. Theoretical prediction models for ground settlement during box jacking[J]. Mechanics of advanced materials and structures, 2022, 29(26): 5588-5595.
- [6] 许有俊, 王雅建, 冯超, 等. 矩形顶管施工引起的地面沉降变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 192-199.
- XU Youjun, WANG Yajian, FENG Chao, et al. Research on ground deformation caused by rectangular pipe jacking construction[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2018, 14(1): 192-199.
- [7] 韩仲慧, 王梅. 浅埋矩形顶管施工对临近管线与地表的影响研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 135-142.
- HAN Zhonghui, WANG Mei. Assessing the effects of shallow-buried rectangular pipe jacking on nearby pipelines and ground surface stability[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 135-142.
- [8] 张志伟, 李忠超, 梁荣柱, 等. 软土地层矩形顶管掘进引起地表隆沉变形分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(S1): 419-430.
- ZHANG Zhiwei, LI Zhongchao, LIANG Rongzhu, et al. Analysis of upheaval and settlement deformation of ground surface caused by excavation of rectangular pipe jacking in soft soil stratum [J]. Rock and soil mechanics, 2022, 43(S1): 419-430.
- [9] 邓婷, 黄茂松, 时振昊, 等. 软黏土深埋矩形顶管施工地层变形分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56(S2): 157-162.
- DENG Ting, HUANG Maosong, SHI Zhenhao, et al. Ground deformation response induced by jacking process of deep rectangular tunnel in soft clay[J]. China civil engineering journal, 2023, 56(S2): 157-162.
- [10] 郭延辉, 孔志军, 李斯桂, 等. 天然气管涵顶管下穿对高速公路的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1958-1964.
- GUO Yanhui, KONG Zhijun, LI Sigui, et al. Research on the impact of natural gas pipeline culvert jacketing on expressway[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(6): 1958-1964.
- [11] 张文瀚, 谢雄耀, 李攀. 浅层顶管隧道施工对路基变形影响数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊2): 1619-1624.
- ZHANG Wenhan, XIE Xiongyao, LI Pan. Numerical analysis of deformation of highway roadbase caused by shallow underground pipe jacking in sand soil[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2011, 7(S2): 1619-1624.
- [12] SHEN Shuilong, CUI Qinglong, HO C E, et al. Ground response to multiple parallel microtunneling operations in cemented silty clay and sand[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2016, 142(5): 04016001.
- [13] SUN Yang, WU Fei, SUN Wenjuan, et al. Two underground pedestrian passages using pipe jacking: case study[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2019, 145(2): 05018004.
- [14] 程伟峰, 江宏庆, 张敬磊, 等. 软土地区矩形顶管下穿高速公路施工全周期监测与分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 3131-3137.
- CHENG Weifeng, JIANG Hongqing, ZHANG Jinglei, et al. Full cycle monitoring and analysis of rectangular pipe jacking under expressway construction in soft soil area[J]. Building structure, 2022, 52(S1): 3131-3137.
- [15] 银英姿, 赵强, 崔芳静, 等. 土压平衡矩形顶管施工引起的地表沉降探究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 95-101.
- YIN Yingzi, ZHAO Qiang, CUI Fangjing, et al. Ground subsidence caused by earth pressure balanced rectangular pipe jacking construction[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2019, 36(1): 95-101.

(编辑: 傅依萱)