

# 大断面平行顶管施工参数对地表沉降影响分析

黄建华<sup>1,2</sup>, 林婉凌<sup>1,2</sup>, 鲍锋<sup>1,2</sup>, 陈伟斌<sup>1,2</sup>

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

**摘要:** 大断面平行顶管施工技术广泛应用于城市市政与交通等建设中, 施工导致的周边地层变形与地表沉降是影响顶管顶进的关键因素。结合大断面顶管工程实例, 系统地分析了顶管施工过程中, 大断面平行顶管的断面尺寸、断面类型、施工工序、管间距等施工参数对周边地表沉降的影响规律。研究表明: 顶管顶进过程中, 周边地表沉降量随顶管断面尺寸的增加而增大; 平行顶管周边地表沉降随顶管间距的增加而减小; 圆形断面顶管较矩形断面顶管顶进时对土体扰动影响更小; 断面尺寸不同的平行顶管, 先施工大矩形断面顶管比先施工小矩形断面顶管对地表沉降的影响更小。研究成果可为顶管优化设计和施工提供借鉴与参考。

**关键词:** 大断面; 平行顶管; 地表沉降; 施工参数; 数值模拟

中图分类号: TU74

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)03-0205-08

## Analysis of impacts of large-section parallel pipe jacking construction parameters on surface settlement

HUANG Jianhua<sup>1,2</sup>, LIN Wanling<sup>1,2</sup>, BAO Feng<sup>1,2</sup>, CHEN Weibin<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering of Colleges and Universities in Fujian Province, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Large-section parallel pipe jacking engineering is widely employed in urban municipal and transportation construction. The deformation of surrounding strata and surface subsidence are the key factors affecting pipe jacking. Based on a large-section pipe jacking project, this study systematically analyzes the impacts of construction parameters—such as cross-section dimensions, cross-section types, construction sequence, and pipe spacing—on surrounding ground settlement during the construction of large-section parallel pipe jacking. Results show that ground settlement around the pipe jacking increases with larger cross-section dimensions; settlement decreases with greater spacing between parallel pipes; circular pipes cause less soil disturbance compared with rectangular pipes during jacking; and for parallel pipes with different cross-section sizes, constructing the ones with larger section first results in less impact on ground settlement than constructing the ones with smaller section first. The research results can provide reference for the optimization design and construction of pipe jacking in the future.

**Keywords:** large section; parallel pipe jacking; surface subsidence; construction parameters; numerical simulation

随着城市化进程的加速, 城市地下空间开发需求日益增长, 顶管法作为一项非开挖施工技术,

因其对地面交通与环境的影响较小, 在城市市政交通等地下工程建设中获得广泛应用<sup>[1-2]</sup>。顶管

收稿日期: 2025-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678153); 福建省自然科学基金资助项目(2021J011064)

第一作者简介: 黄建华(1969—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士, 研究方向: 岩土与地下结构工程、特殊土力学等。

施工过程中会对周围土体产生持续扰动,控制不当会引起开挖面前方土层和地表产生沉降,危害周边建构筑物、道路环境和地下管线等<sup>[3-5]</sup>。

国内外学者针对顶管施工引起的沉降变形问题展开研究。Ma 等<sup>[6]</sup>采用数值模拟分析双线平行顶管施工对地表沉降的影响,发现大小管道先后施工会引起应力叠加,显著增大地表沉降量。邓长茂等<sup>[7]</sup>研究发现在软土地层中,矩形顶管施工引起的地表隆起量与地表沉降量成反比,掘进面地表的隆起与顶进推力相关,地表沉降的原因是施工过程中发生土体损失。Li 等<sup>[8]</sup>通过离心模型试验与数值模拟相结合的方法,研究了顶管施工对既有隧道地表变形的影响规律,发现地表沉降分为剧烈、缓慢和稳定三个阶段,既有隧道发生纵向弯矩变形且呈显著的倒“V”型隆起。张志伟等<sup>[9]</sup>结合弹性力学 Mindlin 解和随机介质理论研究顶管顶进导致的地表隆起现象,得到矩形顶管掘进期间地表隆沉位移的解析解。焦义等<sup>[10]</sup>应用 Mindlin 解分析圆形顶管穿越特殊地层时的沉降规律,发现顶管顶进过程中地表沉降趋势表现为先隆起后沉降,顶管刀盘的正面附加推力对地表沉降影响最大,土体沉降最大值均位于顶管轴线正下方。

目前,对单行顶管或断面尺寸相同的平行顶管施工引起的周边地表沉降的研究较为深入,关于大断面平行顶管施工对地表沉降影响的研究相对较少<sup>[11-14]</sup>。本文应用有限元软件模拟顶管顶进施工过程中的土体及地表变形响应,系统研究了大断面平行顶管的断面尺寸、断面类型、施工工序、管间距等参数对顶管顶进过程中周边地表沉降的影响规律,为类似工程提供理论和技术参考。

## 1 工程概况及扰动分析

### 1.1 工程概况

研究的大断面平行顶管工程位于城市主干道交叉路口,工程地质条件和地下管线布设情况复杂,顶管从东向西方向布设,大矩形断面顶管尺寸为  $9.02\text{ m} \times 9.26\text{ m}$ ,覆土深度  $2.0 \sim 5.5\text{ m}$ ,小矩形断面顶管尺寸为  $9.02\text{ m} \times 6.26\text{ m}$ ,覆土深度  $5.0 \sim 8.0\text{ m}$ ,两顶管均为现浇钢筋混凝土管节,顶管隧道平面位置如图 1 所示。由工程地质勘察资料可知,地层结构自上而下依次为:杂填土、粉质粘土、淤泥、中砂(夹薄层淤泥)和淤泥质粉质黏土,其中顶管施工主要涉及的土层为淤泥层。

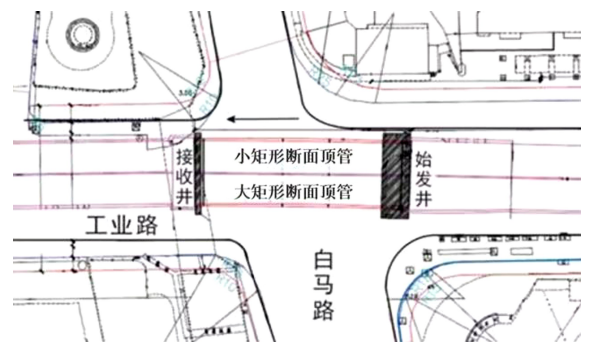


图 1 顶管隧道平面示意图

Fig.1 Plane diagram of pipe jacking tunnel

### 1.2 顶管施工对周围土体扰动分析

平行顶管施工中,顶管外壁与周围土层间的摩阻力会持续扰动土体,其施工摩阻力示意图如图 2 所示。当大矩形断面、小矩形断面顶管先、后施工顶进时,先行顶管的施工扰动了周围土体,后行顶管的施工对土体产生二次扰动。这种施工方式在两管之间的扰动具有叠加效应,重叠区引起地表沉降最为显著。平行顶管相互影响示意图如图 3 所示。

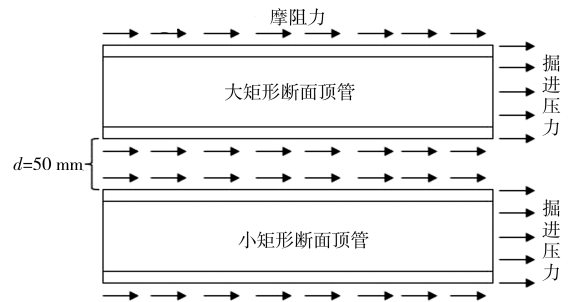


图 2 平行顶管施工摩阻力示意图

Fig.2 Parallel pipe jacking construction friction diagram

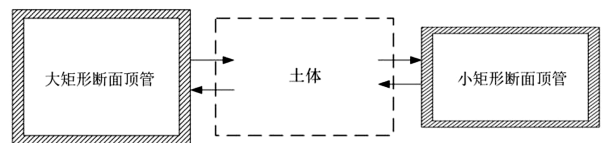


图 3 平行顶管相互影响示意图

Fig.3 Parallel pipe jacking interaction diagram

## 2 三维有限元数值模拟

### 2.1 模型计算参数

采用 ABAQUS 有限元分析软件对大断面平行顶管施工进行模拟分析,其模型材料参数如表 1 所示。

表1 模型材料参数

Tab.1 Model material parameters

材料名称	地层厚度/m	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	重度/kN·m <sup>-3</sup>	泊松比	弹性模量/MPa
①杂填土	3.1	10	10.0	17.0	0.35	15.0
②淤泥	10.0	5.4	10.9	15.9	0.38	10.5
③中砂	2.9	20	3.0	18.0	0.27	30.0
顶管机	—	—	—	78.0	0.20	20.0×10 <sup>3</sup>
顶管管节	—	—	—	25.0	0.20	34.5×10 <sup>3</sup>

注:编号①~③表示数值模型中土层自上而下的分层顺序。

## 2.2 模型基本假定

由于数值模拟无法完整实现顶管施工的全部流程,为简化实际工程中复杂的顶管施工过程和地质条件,对模型作出以下假定:

- (1)土体服从 Drucker-Prager 屈服准则,为连续均匀且各向同性的弹塑性体。
- (2)顶管施工前土体保持稳定状态,忽略地下水对土体、管线的影响。
- (3)忽略管节与管节、管节与顶管机头之间接头的影响,将顶管接头和管节视为整体。
- (4)忽略地表起伏性,假定地表是水平的。
- (5)分析过程仅考虑顶管施工期间引起的地表沉降,忽略土体后期固结及次固结沉降。

## 2.3 边界条件及网格剖分

大断面平行顶管的数值模型如图4所示。

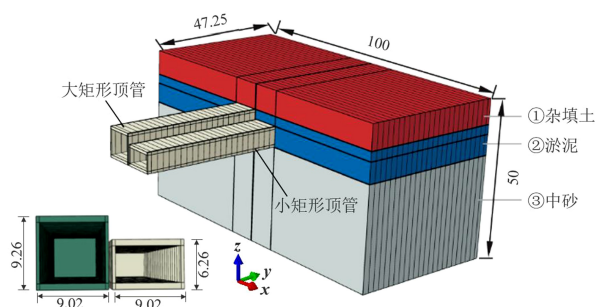


图4 模型的几何形状及相对位置(单位:m)

Fig.4 Model's geometric shape and relative position( unit: m)

如图4所示,设置Z轴方向为竖直方向,Y轴方向为顶管顶进方向,X轴方向为水平方向。X方向的位移受两侧边界的约束,Y方向位移受前后边界的约束,Z方向位移受底部边界的约束。数值模型尺寸为100 m(长)×47.25 m(宽)×15.0 m(高),顶管断面尺寸和施工实际尺寸相同,整体模型的单元类型采用C3D8R单元,对其进行网格

划分,并对局部进行加密处理。

## 2.4 顶管施工过程模拟

模拟平行顶管施工的两个阶段:大矩形断面顶管的顶进阶段和小矩形断面顶管的顶进贯通阶段。为实现高效可靠的有限元分析,对施工过程中涉及的主要荷载进行简化。

### (1) 路面车辆荷载

大断面平行顶管工程位于城市主干道,车流量较大,因此,根据《城市道路工程设计规范》(CJJ37-2012)<sup>[15]</sup>中的路面荷载设计标准,在模型上表面设置10 kPa的均布荷载模拟路面车辆荷载。

### (2) 顶管掘进施工时对前方土体的顶进压力

大断面平行顶管工程采用生死单元法分步开挖的方式模拟顶管掘进施工,设定每个分析步的顶进长度为2 m。在开挖的同时通过对掌子面施加均布荷载,等效模拟顶管机掘进时的顶进压力。顶进压力的计算公式为:

$$F = K_0 \gamma h \quad (1)$$

式中, $F$ 为顶进压力,Pa; $K_0$ 为静止土压力系数; $\gamma$ 为顶管上覆土体重度,kN/m<sup>3</sup>; $h$ 为顶管埋深,m。

### (3) 注浆压力

顶管施工时,管周土体受到注浆压力的作用,模拟施工的注浆压力根据现场工况取值,并以均布荷载的形式施加在管周土体。

数值模型的模拟施工参数见表2,模拟施工步骤见表3。

表2 模拟施工参数

Tab.2 Simulated construction parameters

顶管类型	路面车辆 动荷载/kPa	注浆压力/ MPa	顶进压力/ MPa
大矩形断面顶管	10	0.05	0.12
小矩形断面顶管	10	0.05	0.16

表 3 模拟顶管施工步骤

Tab.3 Simulated pipe jacking construction steps

模拟步骤	具体内容
1	生成土体平衡初始地应力
2	利用生死单元功能模拟土体开挖，同时施加顶进压力
3	通过位移控制法模拟顶管顶进，同时激活注浆压力
4	重复 1-3 步骤，直至平行顶管先后贯通

### 3 不同施工参数对地表沉降的影响

在保持其他参数不变的情况下,单独改变大断面平行顶管的断面尺寸、断面类型、施工工序、管间距等参数,分析在施工过程中,各参数对周边地表沉降变形的影响规律。

#### 3.1 断面尺寸影响

保持顶管管间距不变,在原有模型的基础上,增加平行顶管断面尺寸均为 9.02 m×6.26 m (小矩形)和平行顶管断面尺寸均为 9.02 m×9.26 m (大矩形)两个工况,三组不同断面尺寸顶管贯通时的土体竖向位移云图如图 5 所示。

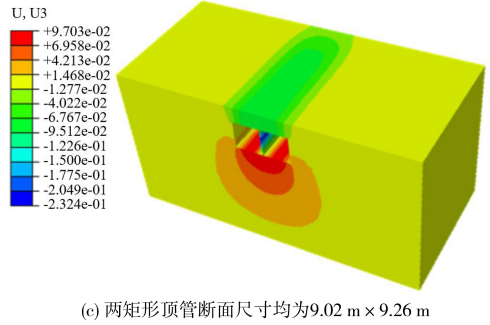


图 5 不同断面尺寸顶管贯通后的土体竖向位移云图(单位:m)

Fig.5 Vertical displacement cloud diagram of soil after penetration of pipes with different section sizes( unit: m)

由图 5 可知,顶管断面尺寸越大,周边土体的最大变形值越大,其中,在顶管顶部发生最大沉降,顶管底部发生最大隆起。距初始顶进位置越近,地表沉降量越大。在两个顶管断面尺寸相同的工况下,平行顶管施工引起的地表沉降分布基本对称;当两个顶管断面尺寸不同时,平行顶管施工过程中断面尺寸大的顶管侧的地表沉降大于断面尺寸小的顶管侧的地表沉降。

提取 Y=13 m 处路径位移数据深入分析断面尺寸对地表沉降的影响,顶管贯通时水平方向上地表位移曲线如图 6 所示。

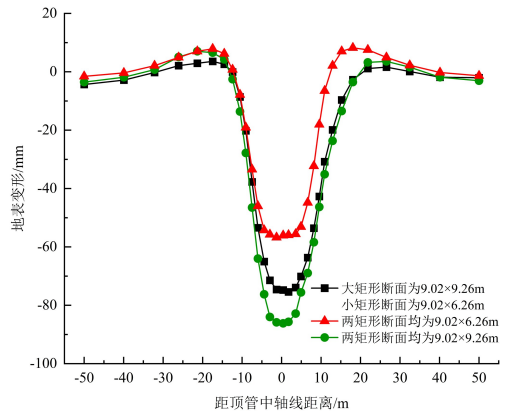
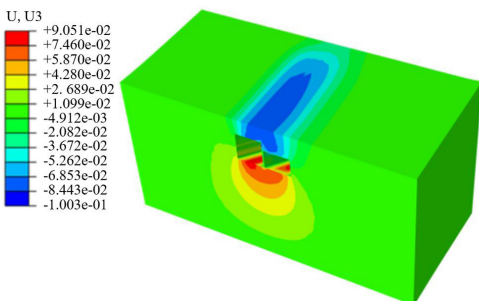
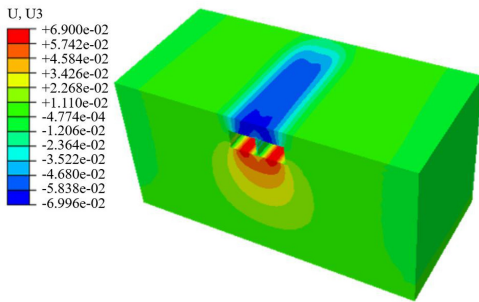


图 6 不同断面尺寸在水平方向上地表变形曲线 (Y=13 m)

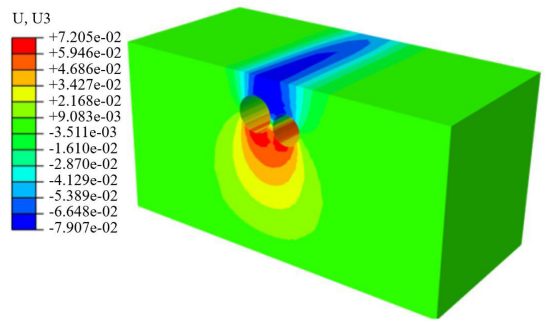
Fig.6 Surface deformation curves of pipes with different section sizes in horizontal direction(Y=13 m)

由图 6 可知,不同断面尺寸顶管顶进完成后,地表沉降曲线均呈“U”形分布,最大沉降值位于两管中心处,距两管中心处越远地表沉降值越小。平行顶管两侧的轻微隆起是由于管节埋深较浅,

顶管顶进过程中土体应力释放与重分布所致。随着顶管断面尺寸的增大,地表最大沉降值随之加大。当小矩形断面顶管高度由 6.26 m 增大至 9.26 m 时(大矩形断面顶管尺寸不变),地表最大沉降值增大了 15.26%,这是因为顶管断面尺寸增大使开挖土方量增加,扩大了土体受扰动范围,引发更大的沉降变形。

### 3.2 断面类型影响

在保持断面面积不变的前提下,将大矩形断面顶管和小矩形断面顶管分别等效为直径 10.40 m 和 8.40 m 的圆形断面顶管,在原有模型的基础上,将小矩形断面替换为等效圆形断面构成矩形-圆形断面的平行顶管,将两个矩形断面均替换为等效圆形断面构成双圆形断面的平行顶管。图 7 为不同断面类型顶管贯通时的土体竖向位移云图。由图 7 可知,不同断面类型引起的土体变形基本一致,均为顶部沉降,底部隆起。最大沉降值从大到小依次为:双矩形顶管(100.30 mm)>矩形-圆形顶管(89.19 mm)>双圆形顶管(79.09 mm)。相较于圆形断面,矩形断面在顶进过程中对周围土体的扰动更为显著,从而导致更大的地表沉降。

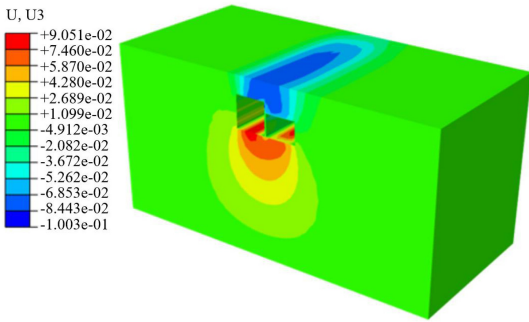


(c) 双圆形顶管土体位移云图

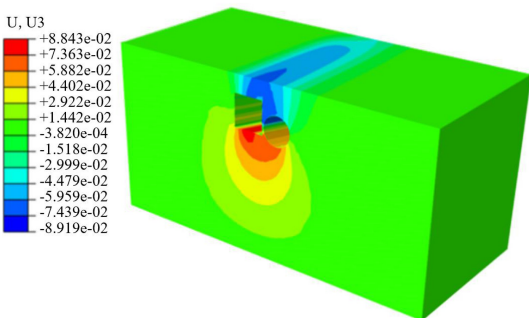
图 7 不同断面类型顶管贯通时的土体竖向位移云图(单位:m)

Fig.7 Vertical displacement cloud diagram of soil after penetration of pipes with different section types (unit: m)

不同断面类型在水平方向上地表变形曲线如图 8 所示。由图 8 可知,顶管顶进完成后地表沉降曲线为“U”型。不同断面类型引起地表沉降影响范围基本一致,但对沉降量的影响较大。对于矩形-圆形组合断面的顶管而言,矩形顶管施工时引发的沉降大于圆形顶管,这是因为矩形顶管顶进时角部出现应力集中现象,对土体扰动更大,而圆形顶管应力分布更均匀,对土体扰动更小。



(a) 双矩形顶管土体位移云图



(b) 矩形-圆形顶管土体位移云图

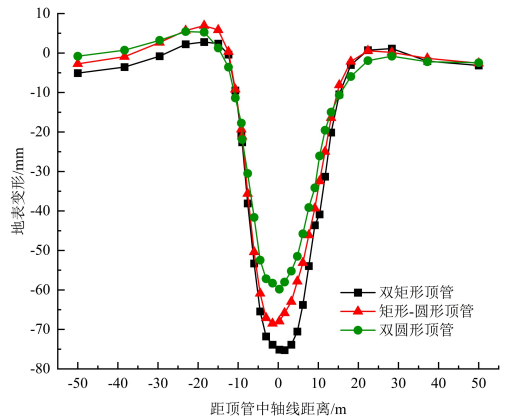


图 8 不同断面类型时水平方向上地表变形曲线(Y=13 m)  
Fig.8 Surface deformation curves of pipes with different section types in horizontal direction (Y=13 m)

### 3.3 施工工序影响

改变顶管顶进的顺序,对比分析“先大后小”与“先小后大”两种施工工序对地表沉降的影响。土体竖向位移云图如图 9、图 10 所示。由图 9、图 10 可知,先行顶管施工对土体造成初步扰动,后行顶管的推进进一步增大了该区域的地表沉降。

“先小后大”施工引起的最大沉降值约为“先大后小”施工的 1.2 倍。

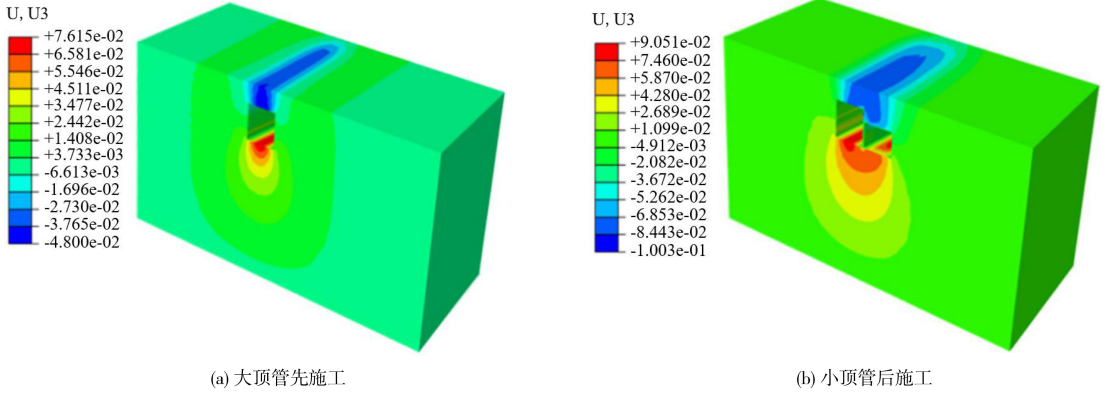


图 9 先大后小顶管贯通后的土体竖向位移云图 (单位:m)

Fig.9 Vertical displacement cloud diagram of soil after connection of first large and then small pipe jacking connection (unit:m)

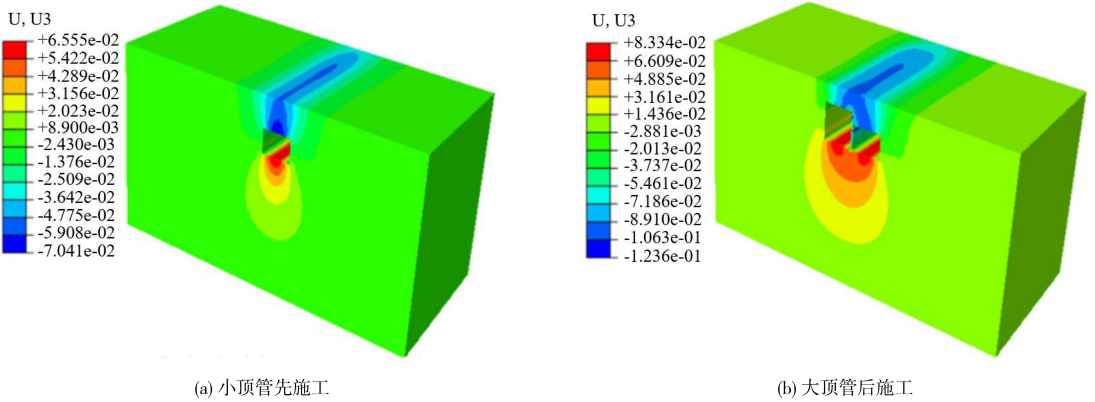


图 10 先小后大顶管贯通后的土体竖向位移云图 (单位:m)

Fig.10 Vertical displacement cloud diagram of soil after connection of first small and then large pipe jacking (unit:m)

图 11 为不同施工工序时在水平方向上的地表变形曲线。

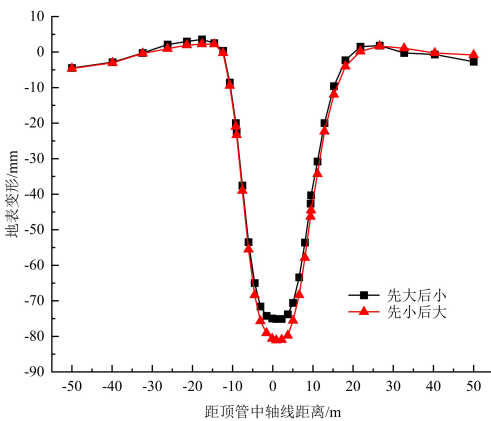


图 11 不同施工工序在水平方向上的地表变形曲线 (Y=13 m)

Fig.11 Surface deformation curves in horizontal direction in different construction procedures (Y=13 m)

由图 11 可知,不同施工工序下顶管顶进完成后的地表沉降曲线形态基本一致,沉降影响范围集中在顶管中轴线两侧 5 m 内,主要影响范围外的地表沉降值差异不大。“先小后大”施工引起的地表沉降大于“先大后小”施工,两者引起的最大沉降值分别为 80.97 mm 和 75.13 mm。具体原因是,在“先小后大”的工序中,小矩形断面顶管施工对土体造成初步扰动,导致土体强度和稳定性降低,后续顶进面积更大、埋深更浅的大矩形断面顶管,进一步叠加放大和加剧了地表沉降。相比之下,“先大后小”施工虽产生较大的初始扰动,但后续小矩形断面顶管施工对土体的影响范围有限,叠加效应较弱。因此,对于断面尺寸不同的平行顶管,采用“先大后小”的施工顺序更有利于控制地表沉降。

### 3.4 顶管间距影响

保持其他参数不变,分别设置管间距为

4.51 m (0.5D)、9.02 m (1D)、18.04 m (2D)、27.06 m (3D) 四种工况,其中,  $D$  为大矩形断面顶管宽度,不同管间距顶管贯通后的土体位移云图如图 12 所示。由图 12 可知,当管间距为 0.5D 时,两管之间有明显的沉降;随着管间距的增加,两管间的地

表沉降量显著减小。当管间距从 2D 增至 3D 时,最大隆起值和沉降值均未发生显著变化,表明在平行顶管施工时,管道间相互影响的有效范围约为 2D。因此,当管间距  $\geq 2D$  时,两管的相互影响显著减弱,管间区域的地表沉降可忽略不计。

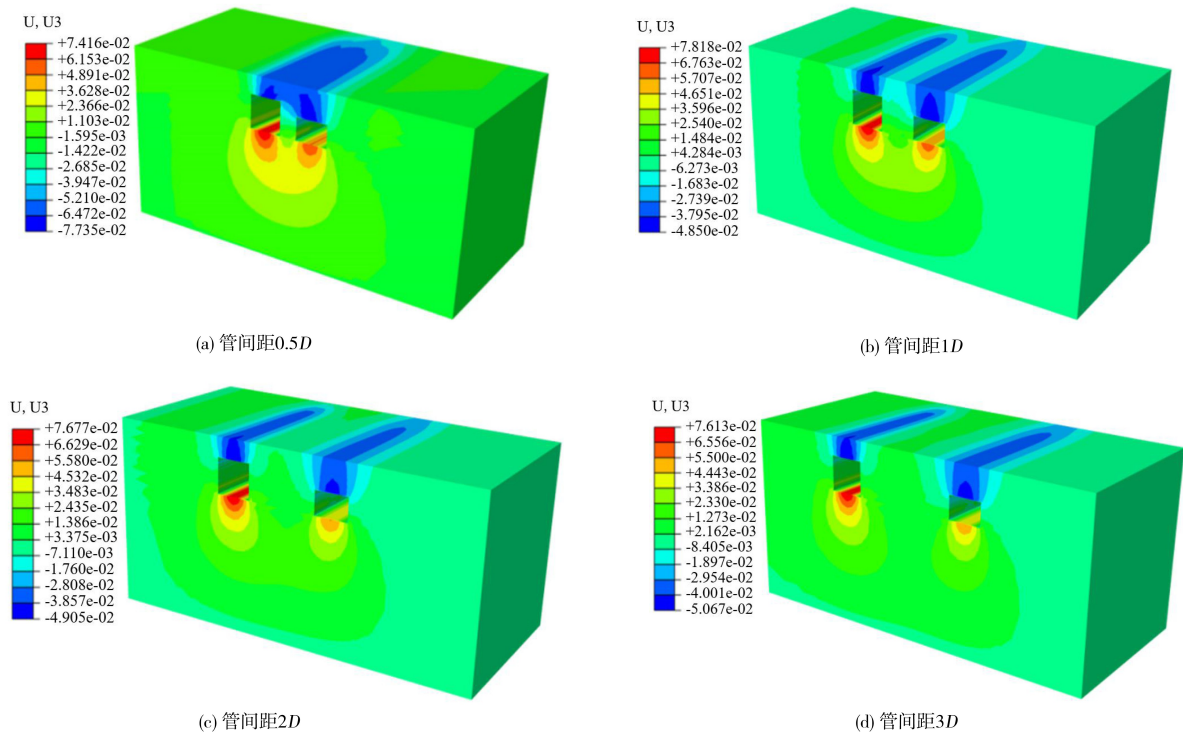


图 12 不同管间距顶管贯通后的土体位移云图(单位:m)

Fig.12 Cloud diagrams of soil displacement after penetration of pipes with different spacings (unit:m)

图 13 为顶管贯通时不同管间距水平方向上地表变形曲线。

图 13 为顶管贯通时不同管间距水平方向上地表变形曲线。管间距的增加使沉降影响范围变大,最大沉降值减小。管间距从 0.5D 增大到 2D 时,沉降影响范围从 36 m 增加至 50 m;最大沉降值从 62.09 mm 减少至 38.5 mm。这是因为当管间距较小时,平行顶管的扰动重叠区作用明显,地表沉降在顶管轴线之间叠加;管间距增大时,平行顶管间的共同扰动区域减少,对地表的扰动作用趋于独立。

### 4 现场实测成果对比

为了验证大断面平行顶管三维数值模型中地表沉降模拟结果的准确性,选取平行顶管施工且小矩形断面顶管后行顶进的工况模拟分析与现场实测结果进行对比。图 14 为小矩形断面顶管地表监测点布置图。图 15 为小矩形断面顶管顶进 20 m 和顶管贯通时地表沉降的实测数据与模拟结果对比图。

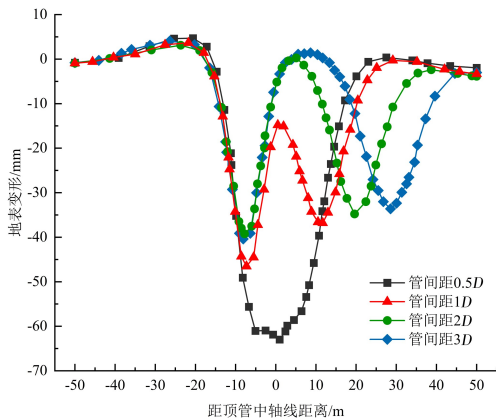


图 13 不同管间距在水平方向上地表沉降曲线 (Y=13 m)  
Fig.13 Ground settlement curves in horizontal direction for different pipe spacings (Y=13 m)

由图 13 可知,平行顶管的管间距对地表沉降曲线的形态具有显著影响。随着管间距的增加,沉

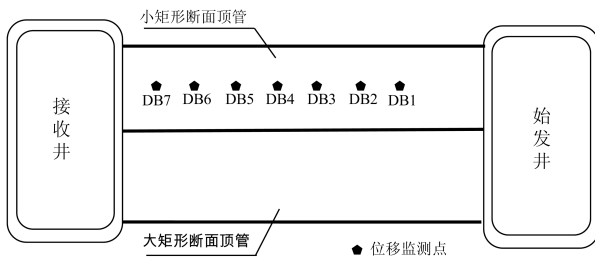


图 14 小矩形断面顶管地表沉降监测点布设图

Fig.14 Layout plan of ground settlement monitoring points for small rectangular-section pipe jacking

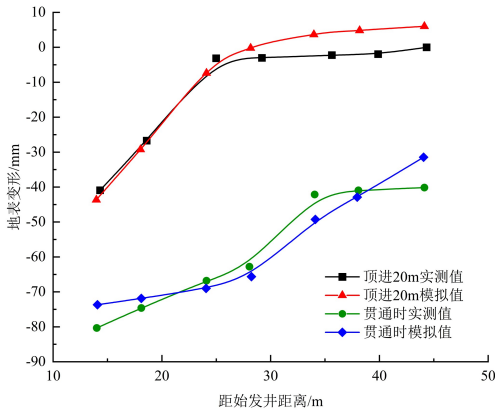


图 15 小矩形断面顶管实测值与模拟值对比曲线

Fig.15 Measured versus simulated curves for small rectangular-section pipe jacking

由图 15 可知,当小矩形断面顶管顶进 20 m 时,前方土体因挤压作用产生一定隆起,后方土体因开挖作用产生较大沉降;小矩形断面顶管贯通

后,距始发井越近地表沉降值越大。对比模拟结果与实测值发现,两者地表变形规律基本一致,模拟最大沉降值为 74.16 mm,实测最大沉降值为 80.96 mm,相对误差为 8.4%。实测值在模拟曲线附近小幅波动,这主要是由于施工过程中地面道路的车辆通行、顶管纠偏等工况均会对现场沉降监测产生干扰影响。总体而言,模拟结果与实测数据较为吻合,能够有效反映大断面平行顶管施工引起的地表沉降规律。

## 5 结论

1) 平行顶管顶进过程中周边地表沉降随断面尺寸的增加而增大,地表最大沉降值位于两管中心处。相较于矩形顶管,圆形顶管顶进时对土体扰动影响更小。

2) 平行顶管的施工顺序对地表沉降有显著影响,先施工大矩形断面顶管相较于先施工小矩形断面对地表沉降的影响更小。

3) 管间距对水平方向上的地表沉降曲线形态有显著影响。当两顶管管间距增加时,地表沉降曲线形态由“V”形转变为“W”形,最大沉降值也由两顶管中轴线上方转变为大矩形断面顶管正上方。

4) 随着管间距的增加,平行顶管间的地表沉降量显著减小。当管间距达到  $2D$  及以上时,两管间的相互影响显著减小。

## 参考文献:

- [1] 金华,马西峰,赵立锋,等. 复杂工程条件下浅埋矩形大断面顶管关键技术与应用研究[J]. 铁道标准设计,2016,60(11):90-95.
- [2] CUI G J, XIE J S, SUN Y H, et al. Analysis and prediction of the factors influencing postconstruction surface deformation of pipe-jacking tunnel in soft clay strata in China[J/OL]. Advances in Civil Engineering, 2023;6474415. <https://doi.org/10.1155/2023/6474415>.
- [3] 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.
- [4] 黄建华,鲍锋,王蕴晨,等. 并行差异断面顶管施工对地表变形的影响[J]. 地质科技通报,2021,40(6):185-192.
- [5] 胡聪,郝英奇. 双线平行顶管在不同间距下施工的模式试验与数值模拟分析[J]. 建筑结构,2021,51(S2):1854-1860.
- [6] MA S J, LI M Y, JIN J W, et al. The influence of shallow buried double-line parallel rectangular pipe jacking construction on ground settlement deformation[J]. Alexandria Engineering Journal, 2021,60(1):1911-1916.
- [7] 邓长茂,彭基敏,沈国红. 软土地区矩形顶管施工地表变形控制措施探讨[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(4):1002-1007.

[M]//Ad Hoc Networks. Cham:Springer International Publishing,2021:87-99.

- [12] ZHAO L, SONG Y J, ZHANG C, et al. T-GCN: a temporal graph convolutional network for traffic prediction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(9):3848-3858.
- [13] HUSSEIN A S, LI T R, YOHANNESE C W, et al. A-SMOTE: a new preprocessing approach for highly imbalanced datasets by improving SMOTE[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2019, 12(2):1412-1422.
- [14] 杨绮梦, 张春平, 常耀文, 等. 基于 ROC 曲线的山区沟道提取最佳汇流量阈值分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(10):93-101.
- [15] 宋玲玲, 王时绘, 杨超, 等. 改进的 XGBoost 在不平衡数据处理中的应用研究[J]. 计算机科学, 2020, 47(6):98-103.

(责任编辑:方素华)

(上接第 212 页)

- [8] LI Z J, WENG X L, CUI Y C. Study on the influence of pipe jacking construction on existing subway tunnels[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(23):651.
- [9] 张志伟, 李忠超, 梁荣柱, 等. 软土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.
- [10] 焦义, 梁禹, 冯金勇, 等. 多因素影响下顶管施工引起土体变形计算研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1):192-199.
- [11] 肖旦强, 张仕超, 胡智, 等. 大断面矩形顶管施工对近接斜交既有隧道影响研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1):441-447.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 胡聪, 郝英奇. 双线平行顶管在不同间距下施工的模式试验与数值模拟分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2):1854-1860.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路工程设计规范: CJJ37-2012[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2016.

(责任编辑:马晓磊)