

## 浅埋大直径钢管幕施工方案及其影响分析\*

袁齐虎<sup>1</sup> 王叶斌<sup>1</sup> 张兴其<sup>2</sup> 杨新安<sup>3</sup> 李路恒<sup>3</sup> 李赵翰青<sup>3</sup>(1. 中铁四局集团第四工程有限公司, 230012, 合肥; 2. 合肥市市政设计研究总院有限公司, 230031, 合肥;  
3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海)

**摘要** [目的] 浅埋管幕施工会对地层产生扰动, 引起地面变形, 因此, 需研究管幕结构顶进顺序对地面沉降的作用规律, 以减小管幕群管顶进对软土地层的扰动。[方法] 以合肥市庐州大道浅埋隧道段工程为例, 对钢管幕顶进施工地面沉降情况进行监测; 结合有限差分模型, 分析钢管幕顶进顺序对地面沉降的影响。根据监测数据、顶进实际工况和有限差分模型, 分析不同钢管幕顶进施工方案对地面变形的差异化影响, 优化钢管顶进顺序。[结果及结论] 相较于上排钢管, 下排钢管的顶进施工对地面沉降的影响更大; 整体钢管幕的顶进施工方案宜先顶进上排钢管, 然后顶进两侧竖向钢管, 最后顶进下排钢管; 横向钢管的顶进施工应从中间开始, 然后依次交替顶进, 两侧竖向钢管从上至下顶进, 同一水平高度的钢管同时顶进。

**关键词** 隧道; 浅埋管幕施工; 顶管顺序

**中图分类号** U231.3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.12.028

### Construction Scheme and Influence Analysis of Shallow-Buried Large Diameter Steel Pipe Curtain

YUAN Qihu<sup>1</sup>, WANG Yebin<sup>1</sup>, ZHANG Xingqi<sup>2</sup>, YANG Xin'an<sup>3</sup>, LI Luheng<sup>3</sup>, LI Zhaoanqing<sup>3</sup>

(1. The Fourth Engineering Co., Ltd. of CTCE Group, 230012, Hefei, China; 2. Hefei Planning Design Institute Co., Ltd., 230031, Hefei, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] The construction of shallow-buried pipe curtain structure may disturb the stratum and cause ground deformation. Therefore, it is necessary to study the influence of pipe curtain structure jacking sequence on land subsidence in order to reduce the disturbance of soft soil stratum caused by the jacking of pipe curtain groups. [Method] Taking the shallow-buried tunnel section of Luzhou Avenue in Hefei City as an example, the land subsidence caused by steel pipe curtain jacking construction is monitored; combined with the finite differ-

ence model, the influence of the steel pipe curtain jacking sequence on land subsidence is analyzed. Based on the monitoring data, the actual jacking conditions and the finite difference model, the differential effects of different steel pipe curtain jacking construction schemes on ground deformation are analyzed, and the steel pipe jacking sequence is optimized. [Result & Conclusion] Compared with steel pipes of the upper row, the jacking construction of the lower row steel pipes has a greater impact on land subsidence. Therefore, the jacking construction scheme for the overall steel pipe curtain should first jack the upper row of steel pipes, then the vertical steel pipes on both sides, and finally the lower row of steel pipes; while the jacking construction of the transverse steel pipes should start from the middle, and then jack the steel pipes alternately in sequence; the vertical steel pipes on both sides should be jacked from top to bottom, and the steel pipes at the same level should be jacked simultaneously.

**Key words** tunnel; shallow-buried pipe curtain construction; pipe jacking sequence

随着我国城市建设的快速推进, 地上空间资源日渐稀缺, 地下空间的开发迅速发展起来。地下空间开发的方法有很多, 如明挖法、暗挖法、盾构法等, 近年来一种新的施工方法应运而生——管幕箱涵工法。管幕箱涵工法将管幕法和箱涵法有效地结合在一起, 依靠小口径顶管机进行单管顶进, 管与管之间以锁扣相连, 形成断面内封闭或半封闭形式的管幕<sup>[1-3]</sup>。管幕箱涵工法是一种在管幕围护下顶进大断面箱涵结构的非开挖施工技术<sup>[4]</sup>。管幕箱涵工法作为穿越道路、铁路、机场等非开挖技术, 在许多国家和地区已获得较好的应用效果<sup>[5-6]</sup>。

本文以合肥市庐州大道浅埋隧道段工程为例, 对钢管幕顶进施工地面沉降情况进行监测, 并结合有限差分模型, 分析钢管幕顶进顺序对地面沉降的影响, 提出了更为合理的大直径钢管幕顶进方案。

\* 安徽省住房和城乡建设科学技术计划项目(2021-YF45)

本文研究可为浅埋大直径钢管幕的高效顶进及地面沉降控制提供理论依据。

1 工程概况

庐州大道(繁华大道—锦绣大道)浅埋隧道段位于安徽省合肥市包河区庐州大道与骆岗机场主跑道交界处,隧道在里程 K17 + 95—K19 + 33 处下穿合肥市骆岗机场主跑道,平面交角约为 45.3°。管幕段长为 138 m,隧道顶部最小覆土深度为 5.1 m,最大覆土深度为 6.3 m,结构纵坡为 -0.5%。管幕段平面示意图如图 1 所示。骆岗机场作为合肥市快速发展的见证者,具有重要的历史意义,故在下穿施工过程中应严格控制地面沉降或隆起变形量,保证其不被破坏。

管幕段采用单种直径共 44 根顶管组成围护结构,内部箱涵结构断面尺寸为 29.40 m(宽)×8.75 m(高),管幕段横断面及顶进顺序示意图如图 2 所示。顶管采用  $\phi 1.6\text{ m}\times 16\text{ mm}$  钢管,钢管长为 137 m,其中上、下部各 16 根,钢管间距为 184 mm,左、右边墙各 6 根,钢管间距为 209 mm。管幕段主要穿越⑤<sub>2</sub> 层黏土层,上覆土层为①杂素填土层和⑤<sub>1</sub> 层黏土层。场地土层主要物理力学参数如表 1 所示。⑤<sub>2</sub> 层黏土原状时以硬塑状态为主,干强度及韧性强,并表现有弱膨胀性,遇水或施工扰动后会产生大量的裂隙,抗剪强度大幅下降。

综合考虑庐州大道管幕段土体稳定性、弱膨胀性、管幕成形质量、施工进度和便利性等因素,采用以下顶进施工顺序原则:①钢管幕逐根顶进,因膨胀土超固结力和剪胀力过大,故管幕不设置锁口;



图 1 管幕段平面示意图

Fig. 1 Plan diagram of the pipe curtain section

表 1 场地土层主要物理力学参数

Tab.1 Main physical and mechanical parameters of site stratum

土层名称	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa
①杂素填土	19.0	10.0	8.0	2.5
⑤ <sub>1</sub> 层黏土	20.0	74.5	14.4	13.5
⑤ <sub>2</sub> 层黏土	20.0	79.1	15.0	15.5

②多根钢管可以同时顶进,避免相互影响,以加快施工进度。根据以上原则,管幕顶进顺序见图 2。

2 测点布置方案

结合本文工程的地质条件和施工工况,依据相关规范和经验,在骆岗机场主跑道上设置地面沉降

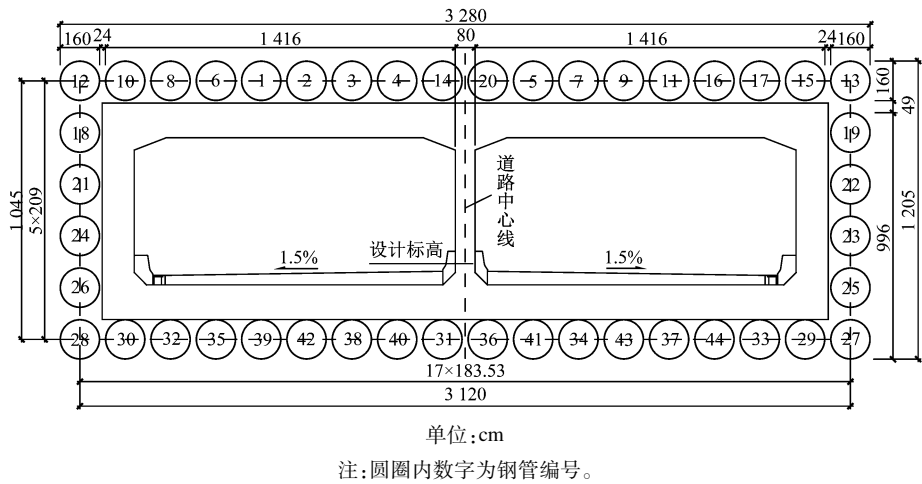


图 2 管幕段横断面及顶进顺序示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross-section and jacking sequence on the pipe curtain section

监测点,其布置示意图如图 3 所示。垂直于隧道轴线方向布置 3 个监测断面,各监测断面距隧道管幕施工起点的距离依次为 22.26 m、68.33 m、114.40 m。监测断面 1 和监测断面 3 的测点布置间距相

同,隧道范围内的测点间距为 3.0 m,隧道轮廓线外的测点间距为 5.0 m,每个监测断面布设 19 个测点;监测断面 2 的测点间距为 3.0 m,测点均布置在机场跑道上,共布设 25 个测点。

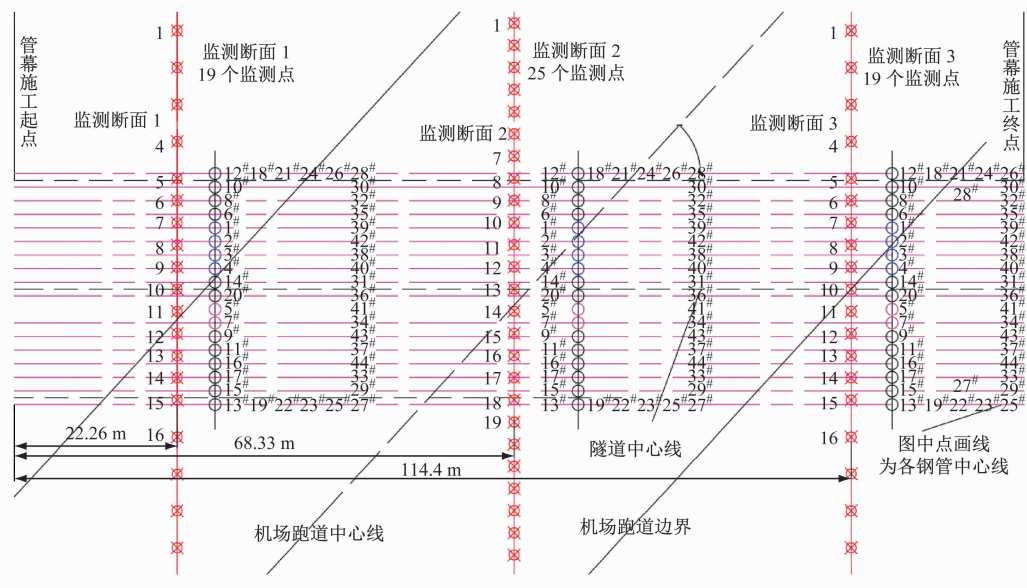


图 3 地面沉降监测点布置示意图

Fig. 3 Layout diagram of the land subsidence monitoring points

### 3 计算模型

利用 FLAC 3D 有限差分软件对管幕顶进过程进行模拟。实际施工中,钢管是逐节顶进的,且存在多台顶管机错位施工的情况,具有明显的时空效应,因此建立三维计算模型更为合理。

为了明确密集钢管幕在施工过程中的相互影响,分别模拟不同钢管幕顶进顺序及间隔条件下的地面变形及钢管幕变形规律。钢管均采用壳单元,本构模型采用弹性本构;土层采用实体单元,本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型,各土层的计算参数见表 1。假设计算边界处不受管幕施工影响,即处于原始应力状态,则边界条件设置为:底部边界约束竖向位移,两侧边界约束水平位移,地面是自由边界。

数值计算模型尺寸为 138 m(长)×50 m(宽)×37 m(高),管幕结构共计 44 根钢管,上排及下排钢管圆心相距 184 mm,两侧竖向钢管圆心相距 209 mm,管幕施工模拟计算模型如图 4 所示。钢管直径为 1.6 m,上排管幕中心线埋深为 4.80 m,下排管幕中心线埋深为 15.35 m。

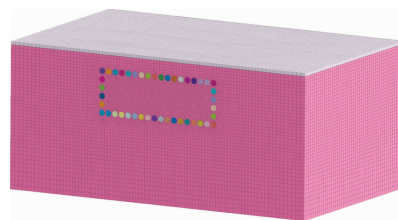


图 4 管幕施工模拟计算模型

Fig. 4 Pipe curtain construction simulation calculation model

数值计算模型的地层划分及整体钢管幕分组示意图如图 5 所示。地层分为两层,从上至下依次为杂填土层(厚度为 0.80 m)和黏土层(厚度为 36.15 m)。钢管幕群按其所在位置共分为 6 组,上排钢管以管幕结构中线为界分为 A 组和 B 组,每组从左至右按 1<sup>#</sup>→8<sup>#</sup>编号,下排钢管分组同样遵循上述分组原则,即 C 组和 D 组,每组 8 根钢管。管幕结构左侧钢管为 L 组,从上至下编号依次为 1<sup>#</sup>→6<sup>#</sup>,右侧钢管为 R 组,从上至下编号依次为 1<sup>#</sup>→6<sup>#</sup>。

### 4 钢管幕顶进顺序设置

#### 4.1 管幕顶进顺序设置

基于所建立的管幕顶进施工三维计算模型,模拟大直径管幕群在 3 种不同施工顺序下的地面变形



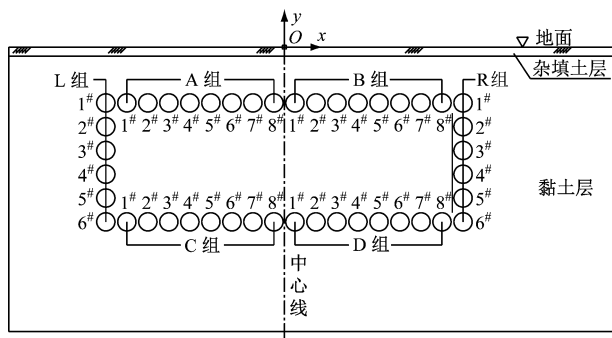


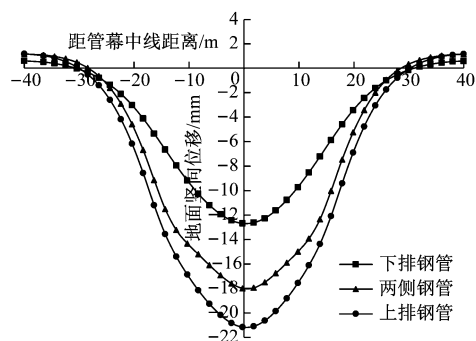
图5 数值计算模型的地层划分及整体钢管幕分组示意图

Fig. 5 Schematic diagram of strata division and overall steel pipe curtain grouping in the numerical calculation model

特征,3种方案为:①方案1——先下排,再两侧,最后上排钢管的顶进顺序;②方案2——先上排,再两侧,最后下排钢管的顶进顺序;③方案3——按照现场实际采用的钢管幕顶进顺序,基本遵循先上排,再两侧,最后下排钢管的顶进顺序。

#### 4.1.1 方案1

钢管顶进方案在遵循先下排、再两侧、最后上排的基础上,下排钢管顶进原则为先中间、再两侧交替顶进,按照该顶进顺序,模拟管幕顶进土体开挖,每根钢管每次顶进2 m。钢管施工过程中,方案1的地面竖向位移曲线如图6所示。



注:距管幕中心距离以坐标原点指向R组钢管方向为正,反之则为负;余类同。

图6 方案1的地面竖向位移曲线

Fig. 6 Vertical ground displacement curves of Scheme 1

下排钢管顶进完成后,地面变形呈现较为光滑的曲线,沉降槽宽度为60.89 m,约为下排钢管宽度的两倍,最大沉降值为12.70 mm。两侧竖向钢管顶进完成后,钢管范围内的地面沉降值增加较多,沉降槽宽度有所减小,最大沉降值为18.04 mm;沉降区域两侧地面隆起高度增加,这是由于两侧竖向浅埋钢管限制了部分地层的位移导致的。上排钢管

施工对地面沉降槽宽度的影响不大,地面最大沉降值为21.18 mm,即上排钢管顶进导致的地面沉降净值小于两侧竖排钢管顶进导致的地面沉降净值。

#### 4.1.2 方案2

钢管顶进方案在遵循先上排、再两侧、最后下排的基础上,上排钢管顶进原则为先中间、再两侧交替顶进。按照该顶进顺序,模拟钢管顶进土体开挖,每根钢管每次顶进2 m。钢管施工过程中,方案2的地面竖向位移曲线如图7所示。

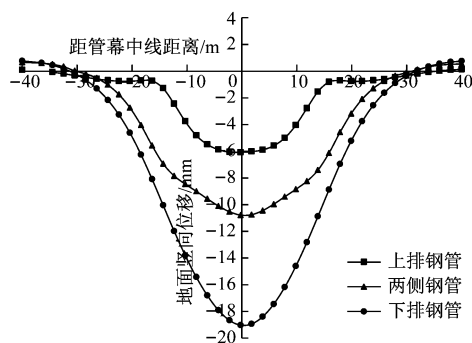


图7 方案2的地面竖向位移曲线

Fig. 7 Vertical ground displacement curves of Scheme 2

不同于方案1的地面竖向位移发展趋势,方案2的上排钢管顶进完成后,地面沉降区域集中在钢管群长度范围内,此区域内地面发生沉降变形,沉降曲线形状类似“碗形”,最大沉降值为6.07 mm,这是由于上排钢管埋深浅,地面随着钢管施工发生沉降。随着两侧竖向钢管完成施工,地面沉降发育,本施工阶段钢管顶进范围内的地面沉降净值大于其范围外的地面沉降净值,在两侧钢管上方出现明显的曲线斜率改变,地面最大沉降值为10.81 mm。当下排钢管施工完成后,管幕群范围内的地面沉降进一步发育,地面沉降槽宽度为62.39 m,地面最大沉降值为19.04 mm。对比方案1的地面沉降曲线,分析地面沉降最大值增长趋势可以看出,下排管幕施工对地面沉降影响最大,两侧竖向管幕在一定程度上限制了其上部地面的位移变形。

#### 4.1.3 方案3

由于现场施工条件和工期原因,在施工时选择了不同于工程设计的顶进方案,实际顶进顺序基本遵循先上排管幕,然后开挖土体顶进两侧竖向钢管,最后顶进下排管幕,但在局部钢管顶进顺序上,又不同于方案2。

方案3基本遵循先上排、再两侧、最后下排的基本原则,按照图2所示的编号顺序进行顶进,其中编

号为 42<sup>#</sup>、43<sup>#</sup>、44<sup>#</sup> 的钢管没有施工。在模拟时,将实际钢管顶进划分为 4 个阶段:①第 1 阶段——上排钢管顶进,即 1<sup>#</sup>至 17<sup>#</sup>钢管;②第 2 阶段——竖向上部钢管及上排部分钢管顶进,即 18<sup>#</sup>至 21<sup>#</sup>钢管;③第 3 阶段——其余竖向钢管顶进,即 22<sup>#</sup>至 28<sup>#</sup>钢管;④第 4 阶段——下排钢管顶进,即 29<sup>#</sup>至 41<sup>#</sup>钢管。

按照上述顶进顺序,模拟钢管顶进土体开挖,每根钢管每次顶进 2 m。钢管施工过程中,方案 3 的地面竖向位移曲线如图 8 所示。

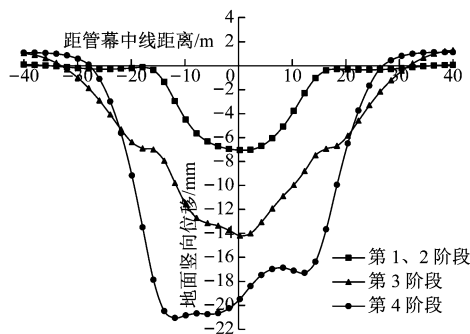


图 8 方案 3 的地面竖向位移曲线

Fig. 8 Vertical ground displacement curves of Scheme 3

上排管幕顶进完成后,地面最大沉降值为 7.04 mm,沉降槽宽度约为 32.7 m,方案 3 的地面沉降区域和沉降值均大于方案 2,这是由于在钢管顶进初期,上排左半部分管幕是连续顶进的。竖向管幕顶进完成后,地面沉降槽宽度进一步增长,约为 65.9 m,在竖向管幕外侧的地面位移出现平台,说明两侧浅埋钢管对地面沉降的控制作用,第 4 阶段施工结束后地面区域宽度减小也印证了这一点。由于下排钢管有 3 根钢管未施工,地面最终沉降曲线不再平滑,最大沉降值为 21.06 mm,发生在 32<sup>#</sup>钢管上方的地面处,在未顶进的钢管上方,地面沉降较小,这也说明地面位移对钢管顶进施工较为敏感,故在施工过程中,需要保证顶进速度及掌子面水土压力的稳定。

#### 4.2 3 种顶进方案对比

3 种方案的地面最终竖向位移曲线对比,如图 9 所示。由图 9 可知:方案 1 和方案 2 在顶进期间引起的地面沉降区域宽度基本相同,但方案 1 引起的地面沉降偏大;方案 3 的地面沉降区域小于前两种顶进方案,但该方案下排管幕有 3 根在实际施工过程中未顶进,按照位移曲线发展规律,若下排管幕全部施工,地面沉降将会更加发育,且管幕结构外

侧地面位移增长速率也会更大。

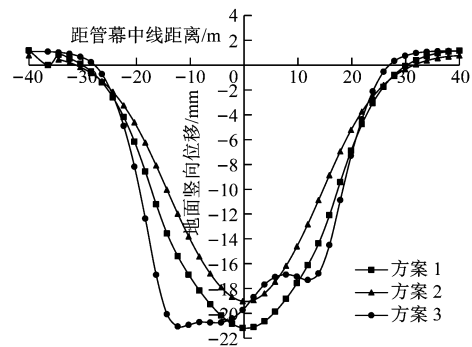


图 9 3 种方案的地面最终竖向位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of the final vertical ground displacement curves among the three schemes

对比 3 种方案可知:方案 1 的施工效果最差,一方面是因为其会产生更大的地面沉降,另一方面是由于竖向钢管从下至上的顶进顺序会使得已施工钢管上方的土体失去稳定性,加剧土层位移;方案 3 相当于方案 2 的简化版,二者同样遵循先上排、再两侧、最后下排管幕施工的原则,但方案 3 的下排钢管顶进顺序与方案 2 不尽相同,上排钢管顶进顺序选择也有所差别。

从地面沉降结果判断,方案 1 的顶进顺序是不合理的,综合判断方案 2 较为合理,即上、下排横向钢管分为四部分,同一横向钢管两部分先顶进中间钢管,再依次交替顶进,两部分同时施工的两根钢管尽可能远离,竖向钢管选择从上至下顶进,编号相同的钢管同时顶进。这样的顶进顺序一方面可以减小地面沉降,另一方面也可以加快施工进度。

#### 4.3 现场监测数据对比

选择监测断面 1、监测断面 2 的地面竖向位移实测数据与地面竖向位移数值计算结果进行对比分析,结果如图 10 所示。

由图 10 a) 可知:数值计算结果与现场监测结果曲线的相关性较高,两条曲线的相关系数为 0.835;在管幕结构外侧,两者结果的吻合度较高;在管幕结构上方,现场地面沉降监测值小于数值计算结果,特别是未顶进的 43<sup>#</sup>、44<sup>#</sup> 钢管上方测点处。由于实际工程中地面有机场跑道,且沉降监测点固定在其结构内,由于机场跑道抗变形能力较其下方土体强,因此其变形滞后于下方土体,故机场跑道沉降未能随着管幕顶进及时显现。

由图 10 b) 可知:相比于监测断面 1,地面沉降数值计算结果与监测断面 2 的实测结果相关性更

高,两条曲线的相关系数为 0.864;在管幕结构外侧,两条曲线各监测点的数值有所差异,反映了数值计算(理想条件)和现场实际监测之间存在差异,但尚在可接受范围内;在距管幕中心左、右各 20 m 范围内,两条曲线的相关性较好,整体变化趋势相同。同监测断面 1 类似,监测断面 2 各测点实测数值基本均小于数值计算结果,在未顶进的 42#至 44# 钢管上方区域的地面沉降曲线表现出相同的变化规律。

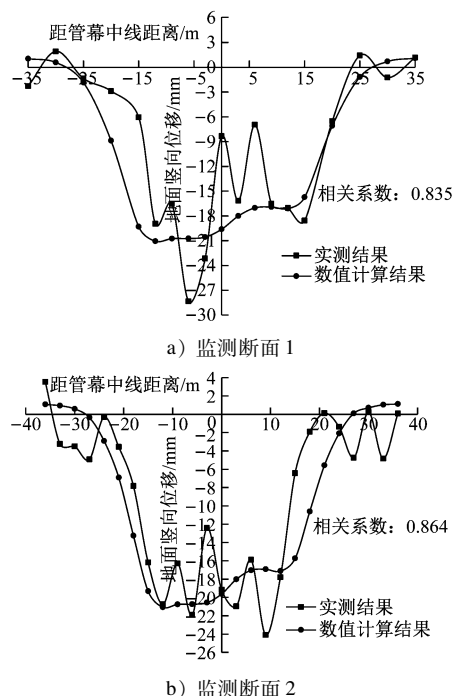


图 10 监测断面 1 和 2 的地面竖向位移实测数据同地面竖向位移数值计算结果对比

Fig. 10 Comparison of measured data and numerical calculation results of vertical ground displacement at monitoring sections 1 and 2

## 5 结语

结合合肥市庐州大道浅埋隧道段实例工程,对钢管幕顶进施工地面沉降情况进行监测,结合有限差分模型,分析钢管幕顶进顺序对地面沉降的影响。根据监测数据、顶进过程实际工况和有限差分模型,分析不同钢管幕顶进顺序对地面变形的差异化影响,提出合理的顶进方案。获得以下结论:

1) 下排管幕施工对地面沉降影响最大,上排管幕施工对地面沉降的影响相对较小,两侧竖向管幕在一定程度上限制了其上部地面的位移。

2) 对于整体钢管幕的施工,推荐将上、下排横向钢管分为四部分,先顶进上排钢管,然后顶进两

侧竖向钢管,最后顶进下排钢管。

3) 横向钢管应先顶进中间钢管,再依次交替顶进;竖向钢管应从上至下顶进,同一高度的钢管同时顶进。这样一方面可以减小地面沉降,另一方面也可以加快施工进度,提高施工效率。

4) 总体来说,数值模拟结果较好地反映了钢管群顶进期间的地面变形规律,数值计算作为先行手段可以指导现场施工,上述结果也为后续箱涵顶进提供了佐证,并可借助数值模拟方法研究相关施工措施,以有效控制地面变形。

## 参考文献

- [1] 张颖, 金国龙, 李昀. 管幕箱涵关键设计及顶进阻力分析[J]. 市政技术, 2022, 40(2): 86.  
ZHANG Ying, JIN Guolong, LI Yun. Analysis of key design and jacking resistance of pipe roofing-culvert method[J]. Municipal Engineering Technology, 2022, 40(2): 86.
- [2] 邢凯, 陈涛, 黄常波. 新管幕工法概述[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(8): 63.  
XING Kai, CHEN Tao, HUANG Changbo. On new tubular roof method[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(8): 63.
- [3] 潘伟强. 软土地区管幕群顶管施工地面沉降监测与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 201.  
PAN Weiqiang. Monitoring and analysis of ground settlement in pipe-curtain group pipe jacking construction in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 201.
- [4] 陈超, 章伟. 软土地区管幕法箱涵顶进施工风险分析[J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(4): 41.  
CHEN Chao, ZHANG Wei. Construction risk analysis on pipe-roofing method in soft clay area[J]. Urban Mass Transit, 2006, 9(4): 41.
- [5] 黎永索, 张可能, 黄常波, 等. 管幕预筑隧道地表沉降分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3701.  
LI Yongsuo, ZHANG Keneng, HUANG Changbo, et al. Analysis of surface subsidence of tunnel built by pipe-roof pre-construction method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3701.
- [6] 苏荣军, 陈立生. 软土地层浅覆土下钢管幕顶进沉降分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(7): 1236.  
SU Rongjun, CHEN Lisheng. Settlement analysis of steel pipe roof jacking in ultra-shallow covered soft ground[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(7): 1236.

· 收稿日期:2022-10-10 修回日期:2022-11-19 出版日期:2024-12-10

Received:2022-10-10 Revised:2022-11-19 Published:2024-12-10

· 第一作者:袁齐虎,高级工程师,1822659598@qq.com

通信作者:李路恒,博士研究生,llhengck@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license