

# 大直径平行顶管施工顺序对地表沉降的影响研究

沈青松, 彭 赵, 朱文灿, 秦文正, 杜年夫

(中国电建华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311100)

**摘要:**大直径平行顶管施工过程中不可避免地会对周围土体产生扰动,导致地表沉降现象。因此,开展地表沉降研究就显得尤为重要。基于杭州取水口上移工程,监测分析平行顶管同步顶进施工时的地表沉降变化规律。通过数值模型分析表明,相较于同步顶进的施工方式,先后顶进引起的沉降值将减小8.55%。进一步分析表明,随着顶管直径比值的减小,先后顶进相较于同步顶进的地表沉降减小幅度会降低;随着顶管埋深和间距的减小,该减小幅度会略有增加。

**关键词:**顶管;地表沉降;施工顺序;工程实践;数值模拟

**中图分类号:** TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2025)01-0029-06

## 0 引言

随着城市化的推进与发展,地上建筑空间日益饱和,需大力开发和利用地下空间。顶管法是一种常见的地下建筑施工方法,具有免开挖、扰动小、速度快等特点,广泛应用于给排水、电力电缆和地下管廊等领域<sup>[1]</sup>。在工程实践中,通常把内径大于2 m的顶管称为大直径顶管<sup>[2]</sup>。大直径顶管相较于小直径顶管具有更强的介质传输能力,方便人进出检修维护,但在施工过程中也更容易对周围土体产生扰动,从而导致地表沉降现象<sup>[3]</sup>。因此,地表沉降分析是大直径顶管工程设计中的重要环节。崔龙飞<sup>[4]</sup>通过有限元软件对大直径钢管穿越江堤时的受力模式和沉降变形进行分析,并与现有规范和公式进行对比。王谭等<sup>[5]</sup>对大直径顶管侧穿高架桥桩的桩体侧移、地表沉降进行了数值分析研究,并采用曲线拟合方法进行预测。

除了顶管直径从小直径向大直径发展,顶管数量也从单根向多根发展<sup>[6]</sup>。针对平行顶管,魏纲等<sup>[7]</sup>提出了平行顶管施工时横向和纵向扰动区范围及工后沉降的计算方法。胡聪等<sup>[8]</sup>通过室内模型试验与有限元模拟相结合的方法研究了不同间距条件下双线平行顶管施工所造成的地表沉降规律。王道伟等<sup>[9]</sup>分别模拟了单管顶进和水平平行顶管的施工过程,研究分析了平行顶管之间的相互影响。

本研究基于杭州取水口上移工程的地表沉降监测数据,分析平行顶管同步顶进施工下的地表沉降变化规律,建立数值模型模拟平行顶管同步顶进施工,进一步分析施工顺序对地表沉降的影响。通过改变模型中的施工参数,分析不同工况下施工顺序对地表沉降的影响。

## 1 杭州取水口上移工程

### 1.1 工程概况

杭州市取水口上移工程(一期)位于杭州市西湖区、富阳区,主要建设内容为2根平行的压力输水钢管(直径分别为2.8 m和3.2 m),总长约6.8 km。管道平面布置如图1所示,全程采用顶管法施工,沿线设置20个顶管井(DG01和DG23为二期工程,后期又调整取消了DG18),顶管井采用沉管法和明挖法施工。使用的地表沉降监测数据来自工作井DG09至接收井DG08(标段1)以及工作井DG20至接收井DG19(标段2)2个标段。

收稿日期:2024-07-11 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzb.20240181

作者简介:沈青松(1996—),男,工程师,研究方向为市政给排水工程。E-mail:shen\_qs1@hdec.com

沈青松,彭赵,朱文灿,等.大直径平行顶管施工顺序对地表沉降的影响研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2025,38(1):29-34.

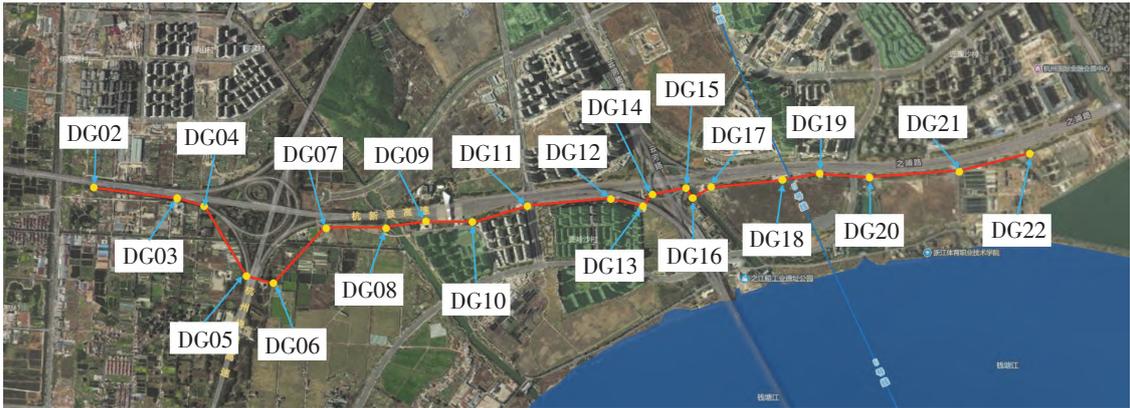


图 1 管道平面布置图

标段 1 管道全长 253 m,剖面示意图如图 2(a)所示,土层地质参数如表 1 所示。管道中心水平间距为 6 m,管道中心埋深为 13.6 m。沉降监测剖面由 4 个测点组成:测点 2、3 分别位于左、右管道中心的正上方,测点 1、4 分别位于测点 2、3 的左右两侧,4 个测点之间的水平间距均为 6 m。标段 2 管道全长 316 m,剖面示意图如图 2(b)所示,土层地质参数如表 2 所示。管道中心水平间距同样为 6 m,管道中心埋深为 19.8 m。沉降监测剖面的测点布置方式与标段 1 相同。

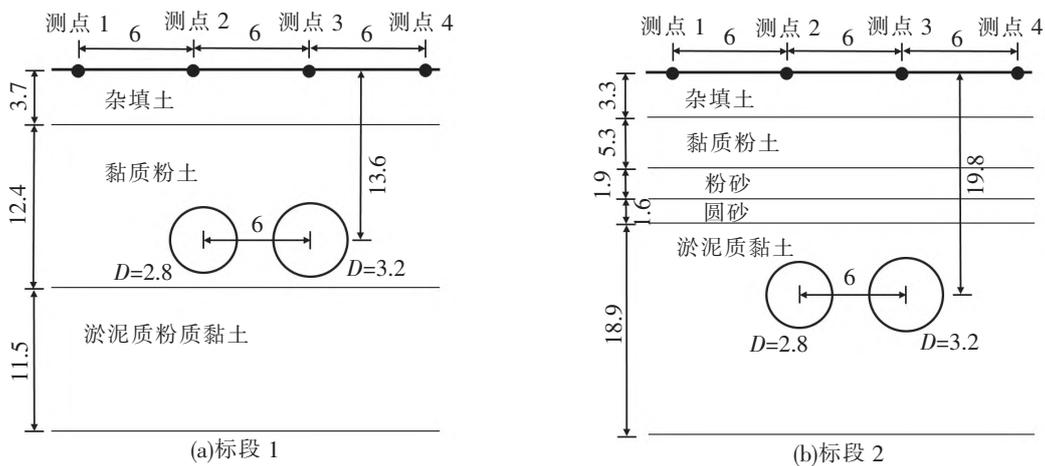


图 2 管道剖面示意图(单位:m)

表 1 标段 1 土层地质参数

土层	深度/m	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	压缩模量/MPa
杂填土	3.7	18.0	3	8	2.5
黏质粉土	12.4	18.5	5	18	5.0
淤泥质粉质黏土	11.5	17.3	12	9	2.8

表 2 标段 2 土层地质参数

土层	深度/m	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	压缩模量/MPa
杂填土	3.3	18.0	3	8	2.5
黏质粉土	5.3	18.3	5	19	5.0
粉砂	1.9	19.0	3	24	7.0
圆砾	1.6	20.0	3	34	1.5
淤泥质黏土	18.9	17.3	12	9	2.8

1.2 监测结果分析

2 个标段均采用左右管道同步顶进的施工方式,顶进速率约为 10 m/d。地表沉降监测结果如图 3 所

示,从图 3 可以看出,地表沉降变化规律可分为 3 个阶段。在顶管开始施工后的几天内,地表沉降基本没有明显增加。随后,地表沉降迅速增加,再逐渐放缓。以标段 1 测点 2 的沉降值为例:4~8 d,沉降从 2.47 mm 增加至 12.14 mm,增速为 2.42 mm/d,增量为最终值的 66.28%;9~25 d,沉降从 12.94 mm 增加至 14.59 mm,增速仅为 0.10 mm/d。这是由于在初始阶段,顶管距离沉降监测剖面较远,顶管施工对监测剖面所处位置的地表沉降几乎无影响。随后,由于此时顶管开始穿越监测剖面,施工影响较大,地表沉降迅速增加。接着,顶管穿越监测剖面,且距剖面越来越远,施工影响也逐渐变小。此外,测点 1 和测点 2 在变化趋势和数值上基本相同,测点 3 则与测点 4 基本保持一致,沉降监测剖面表现为明显的对称特性。这是由于 2 根平行顶管直径较为相近,且采用同步顶进的施工方式,因此地表沉降表现为对称特性。

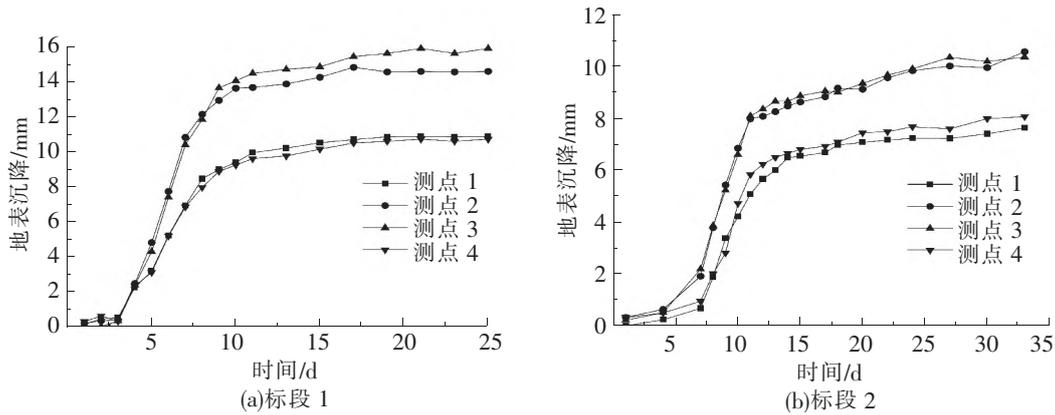


图 3 地表沉降监测结果

## 2 数值模拟分析

### 2.1 模型建立

通过 Abaqus 软件建立数值模型对取水口上移工程标段 1 的顶管施工过程进行模拟分析,数值模型如图 4(a) 所示。顶管水平方向的影响范围考虑为 5 倍~6 倍管道直径<sup>[10]</sup>,模型  $x$  轴方向长度取 50 m。参考钻孔取样试验结果,模型  $z$  轴方向长度取 30 m,对应的土层厚度与物理力学参数与表 1 一致。由现场监测结果分析可知,地表沉降变化主要发生在顶管距监测剖面前后 20 m 范围内,模型  $y$  轴方向长度取 60 m,考虑顶管距监测剖面 -20、-10、0、10、20 m 5 种施工工况(负值代表顶管未到监测剖面,正值代表顶管已穿过监测剖面)。管道位置参考图 2(a),中心水平间距为 6 m,埋深为 13.6 m。模型四周与底面施加相应的位移变形边界条件并划分计算网格。数值模拟无法完全还原顶管施工中顶推、注浆、减阻、出渣等环节,需进行简化处理:首先采用“生死单元法”移除土体模拟土体开挖;分别对开挖面和顶管四周土层施加压力模拟顶推力和注浆压力;在顶管和土层之间设置接触,摩擦系数为 0.3;采用“生死单元法”激活顶管模拟顶管顶进。重复以上步骤,直至 5 种工况计算完成,模型最终竖向位移云图如图 4(b) 所示。

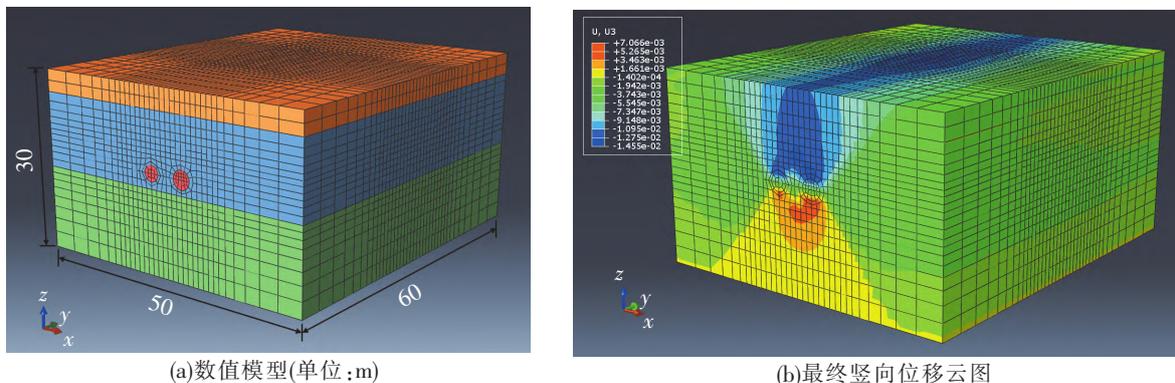


图 4 数值模拟模型及计算结果

## 2.2 结果验证

图 5 为数值模型计算结果与现场监测数据的对比图,从图 5 可以看出,两者在数值大小上符合较好。除了“距剖面 -20 m”工况对应的相对误差在 25% 左右,其余 4 种工况的相对误差均小于 10%,且很多测点位置的相对误差小于 5%。以“距剖面 20 m”工况为例,数值模型与实测数据的相对误差分别为 2.35%、1.36%、4.95% 和 9.31%。这表明数值模型可以较好地模拟平行顶管施工引起的地表沉降变化过程,模型精度满足分析要求。

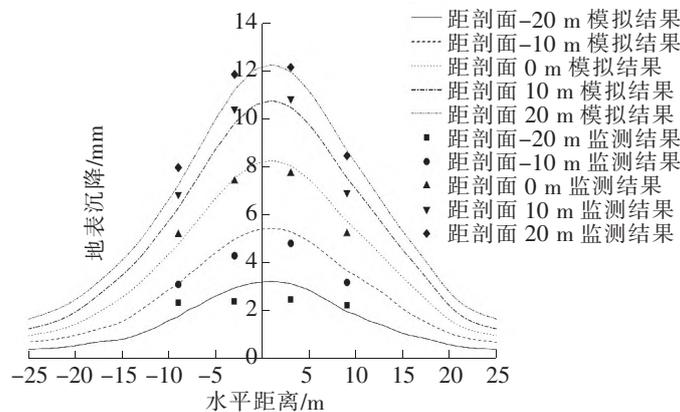


图 5 数值模型计算结果与现场监测数据对比

## 2.3 施工顺序影响分析

改变数值模型的顶管施工顺序,得到平行顶管同步顶进和先后顶进 2 种施工顺序下地表沉降变化规律如图 6 所示。在同步顶进的施工方式下:沉降最大值则是从 3.24 mm 增加至 12.28 mm。在先后顶进的施工方式下:当只顶进左管时,地表沉降关于左管中心呈对称特性,最大值从 1.59 mm 增加至 6.23 mm;当开始顶进右管后,地表沉降仍表现为对称特性,只是对称轴从左管中心逐渐向右偏移,最大值从 7.57 mm 增加至 11.23 mm。相较于同步顶进的施工方式,先后顶进的最终沉降最大值减小了 8.55%。这是由于先后顶进的施工方式给予了土体恢复稳定的时间,从而降低了后行顶管的施工扰动,因此地表沉降小于同步顶进。

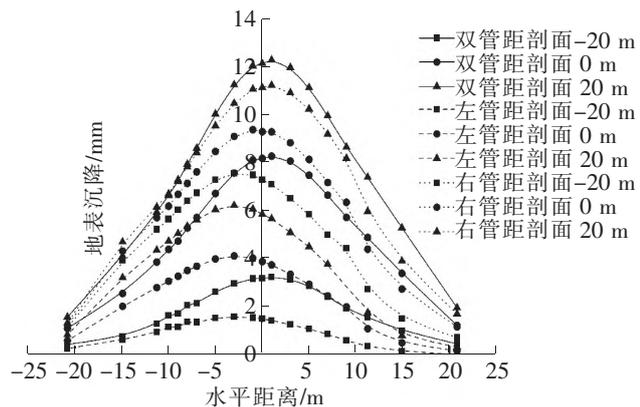


图 6 同步顶进与先后顶进地表沉降对比

## 3 多工况下施工顺序影响分析

在工程实践中,平行顶管的直径、埋深和间距等参数通常有所不同,因此需进一步分析不同工况下施工顺序对地表沉降的影响。首先将初始模型进行简化:平行顶管直径均设为 3 m,埋深设为 15 m,顶管中心水平间距设为 6 m,土层简化为一层,物理力学性质参考表 1 中的黏质粉土层。

保持左管直径不变,改变右管直径,得到不同顶管直径下地表沉降变化规律如图 7 所示。从图 7 可以看出,随着右管直径的减小,沉降最大值逐渐减小,最大值对应的水平距离从 0 轴向左管偏移。这是由于管径越小,施工时对沉降的影响越小,导致沉降值减小,最大值对应的水平距离发生偏移。在 3 种施工顺序中:同步顶进对应的沉降值大于另外 2 种施工方式,小直径管先顶进则略大于大直径管先顶进。随着右管直径从 5 m 减小至 1 m:小直径管先顶进相较于同步顶进的降幅分别为 15.65%、12.31%、9.93%、6.20% 和 3.75%,降幅逐渐减小;大直径管顶先顶进相较于小直径管先顶进的降幅为 0%、1.56%、2.88%、1.45% 和 0.89%,降幅先增大后减小。

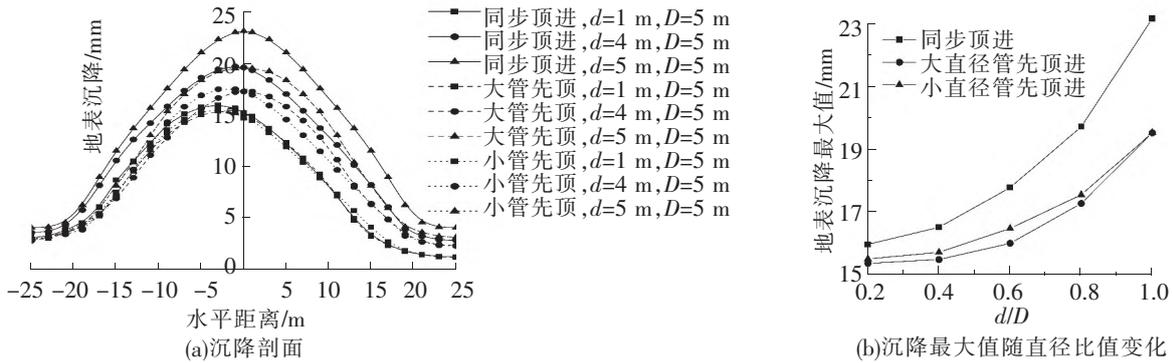


图 7 不同顶管直径下地表沉降变化规律

改变平行顶管埋深,得到不同顶管埋深下地表沉降变化规律如图 8 所示。从图 8 可以看出,随着顶管埋深的减小,沉降最大值逐渐增加,沉降剖面曲线从“平缓状”逐渐变为“陡峭状”,整体仍然关于 0 轴呈对称特性。这是由于顶管埋深越小,施工对于地表土体的扰动就越大,进而导致地表沉降越大。随着顶管埋深的减小,先后顶进施工方式相较于同步顶进的沉降降幅分别为 14.34%、15.19%、15.92%、17.13% 和 18.61%,降幅逐渐增加。这是由于顶管埋深较小时,先后顶进施工方式对于土体扰动的减弱作用较为明显,沉降降幅大于埋深较大的工况。

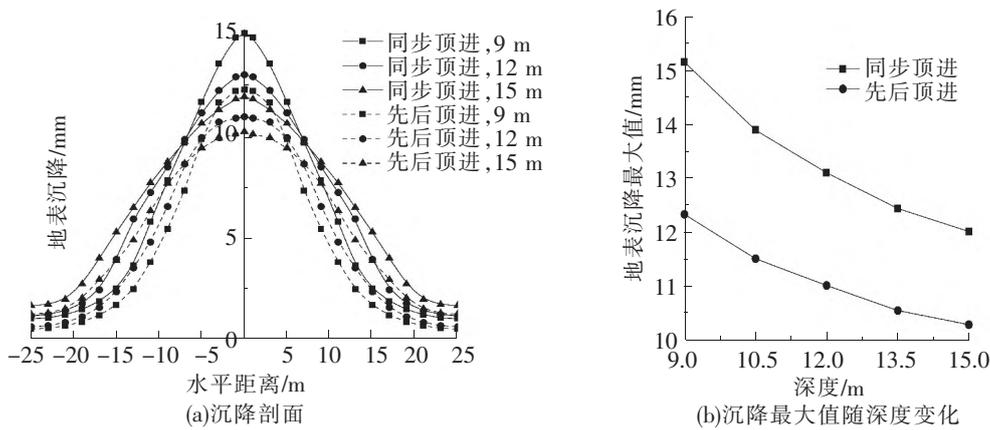


图 8 不同顶管埋深下地表沉降变化规律

改变平行顶管中心的水平间距,得到不同顶管间距下地表沉降变化规律如图 9 所示。从图 9 可以看出,随着顶管间距的减小,沉降最大值逐渐增加。这是由于平行顶管地表沉降是 2 个管道沉降叠加的结果,减小顶管间距将会使中点位置处沉降在叠加后增加。随着顶管间距的减小,先后顶进施工方式相较于同步顶进的沉降降幅分别为 10.29%、10.55%、11.01%、11.51% 和 12.33%,降幅逐渐增加。

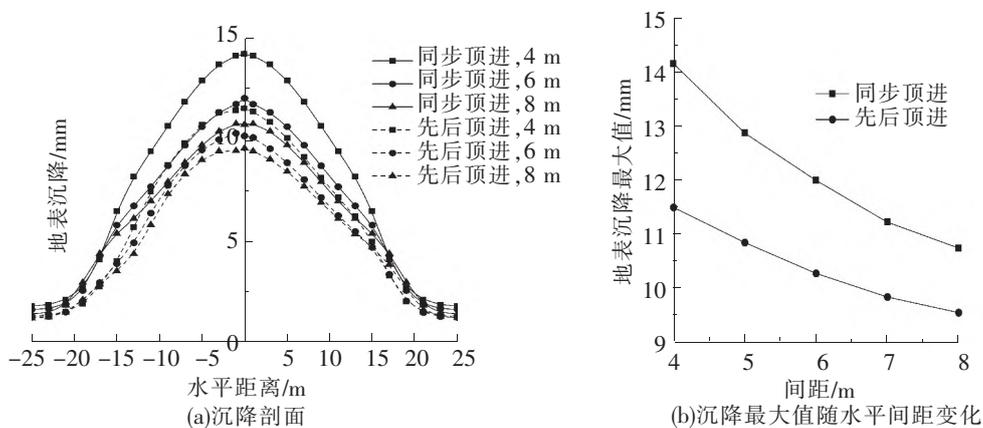


图 9 不同顶管间距下地表沉降变化规律

## 4 结论

通过分析杭州取水口上移工程的地表沉降监测数据,建立数值模型,研究不同工况下施工顺序对地表沉降的影响,得到结论如下:

(1)相较于同步顶进的施工方式,先后顶进的施工方式引起的地表沉降最终值将减小8.55%。

(2)随着顶管直径比值的减小,先后顶进相较于同步顶进的沉降较小幅度从15.65%降低至3.75%。顶管直径差异性越大,施工方式导致的沉降差异性越小。

(3)随着顶管埋深和间距的减小,先后顶进相较于同步顶进的地表沉降减小幅度分别从14.34%增加至18.61%、从10.29%增加至12.33%。施工方式导致的沉降差异性对于顶管埋深和间距的参数敏感性较低。

## 参 考 文 献

- [1]洪开荣,冯欢欢.近2年我国隧道及地下工程发展与思考(2019—2020年)[J].隧道建设(中英文),2021,41(8):1259-1280.
- [2]葛春辉.顶管工程设计与施工[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [3]安刚建,董聪,林键,等.大直径四排平行顶管地表沉降数值模拟研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2022,40(2):10-13.
- [4]崔龙飞.大直径钢管管穿越长江大堤设计与施工问题分析[J].给水排水,2020,56(1):109-114.
- [5]王谭,安关峰.大直径顶管近距离侧穿高架桥桩的数值分析[J].特种结构,2018,35(1):34-39.
- [6]应宏伟,姚言,王奎华,等.双线平行顶管上跨地铁盾构隧道施工环境影响实测分析[J].上海交通大学学报,2023,57(12):1639-1647.
- [7]魏纲,魏新江,屠毓敏.平行顶管施工引起的地面变形实测分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊1):3299-3304.
- [8]胡聪,郝英奇.双线平行顶管在不同间距下施工的模型试验与数值模拟分析[J].建筑结构,2021,51(增刊2):1854-1860.
- [9]王道伟,王福芝,黎轩,等.水平平行顶管相互影响试验研究[J].地质科技情报,2016,35(2):71-74.
- [10]黄吉龙,陈锦剑,王建华,等.大口径顶管顶进过程的数值模拟分析[J].地下空间与工程学报,2008,4(3):489-493.

## Influence of Construction Sequence of Large-diameter Parallel Pipe Jacking on Surface Settlement

SHEN Qingsong, PENG Zhao, ZHU Wencan, QIN Wenzheng, DU Nianfu

(Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311100, China)

**Abstract:** During the construction process of large-diameter parallel pipe jacking, it is inevitable to cause disturbance to the surrounding soil, leading to surface settlement. Therefore, conducting research on surface subsidence is particularly important. Based on the Hangzhou water intake upward project, the changes in surface settlement during parallel pipe jacking construction were monitored and analyzed. Numerical model analysis shows that compared to the synchronous jacking construction method, the settlement caused by successive jacking will be reduced by 8.55%. Further analysis shows that as the ratio of top pipe diameters decreases, the reduction in surface subsidence caused by successive jacking compared to synchronous jacking will decrease; as the burial depth and spacing of the top pipe decrease, the magnitude of the decrease will slightly increase.

**Key words:** pipe jacking; surface settlement; construction sequence; engineering practice; numerical simulation