

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.024

引用格式:李全英,杨明明,薛冰爽,等.不等径平行圆形混凝土顶管施工对环境敏感区地表沉降影响研究[J].公路与汽运,2025,41(2):113-117.

Citation:LI Quanying,YANG Mingming,XUE Bingshuang,et al.Study on the influence of jacking construction of uneven diameter parallel circular concrete pipe on surface settlement in environmentally sensitive area[J].Highways & Automotive Applications,2025,41(2):113-117.

不等径平行圆形混凝土顶管施工对环境敏感区 地表沉降影响研究^{*}

李全英¹,杨明明¹,薛冰爽²,张永兴²

(1.中建八局第一建设有限公司,山东 济南 250100;2.南京林业大学 土木工程学院,江苏 南京 210037)

摘要:依托某下穿文物保护区的 3 根不同直径平行圆形钢筋混凝土顶管工程(其中一根顶管外径 5.4 m,为现阶段国内较大直径顶管),根据顶管施工阶段主要荷载建立三维数值分析模型,研究顶管尺寸、空间位置、施工顺序等对环境敏感区地表沉降的影响。结果表明,3 根平行顶管施工结束时地表沉降槽均以直径较大的顶管为中心,两侧顶管同时施工对地表沉降的影响大于中间顶管施工的影响,且直径较大的顶管施工对地表沉降影响最显著;顺次逐个施工顶管对地表沉降的影响最不利,对应的最终地表沉降最大值达 12.01 mm;先施工中间顶管再同时施工两侧顶管或同时施工两侧顶管再施工中间顶管对应的最终地表沉降最大值相差较小,分别为 6.70 mm、7.24 mm,可选取这 2 种施工方法进行顶管施工。

关键词:隧道;平行多顶管;大直径顶管;施工顺序;地表沉降;环境敏感区

中图分类号:U455.4

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0113-05

顶管法已成为地下综合管廊施工的一种热门方法^[1-2]。目前,国内外学者已就顶管施工引起的土体变形开展了较多研究。韩焯等考虑北京地区土质因素,提出了适用于北京地区的地表沉降槽宽度计算公式^[3]。施成华等针对既有顶管施工扰动区土体变形预测公式的不足,提出了基于随机介质理论的顶管施工扰动区土体变形计算方法并编制了相应计算程序^[4]。桂林等基于苏州轨道交通 5 号线某车站过街通道工程,研究城市浅埋矩形顶管施工造成的地表沉降变化规律,认为 Peck 公式及随机介质理论均可用于预测浅埋矩形顶管施工造成的地表沉降^[5]。黄朝焯基于土力学理论,提出了矩形顶管施工扰动下地层间隙参数与地层损失率解析计算公式及矩形顶管施工引起土体变形近似解析公式^[6]。李方楠等考虑顶管姿态、开挖面土压力、顶进与换管、注浆过程等因素,提出了基于弹性力学 Mindlin 解的顶管施工注浆压力引起土体位移的计算方法^[7]。邓小钊对并行双顶管下穿高速公路桥梁施工引起的土体和

桥梁结构变形进行了分析评价^[8]。夏德欣分析了某工程顶管埋深对路基工作区的影响,估算了顶管下穿公路引起的道路沉降^[9]。李鑫等依托梅溪湖污水顶管工程,分析了管节在应力异常变化区段的承载模式和导致管节纵向应力异常变化的原因^[10]。为满足城市核心区地下管线入廊需求,顶管法施工地下综合管廊面临诸多问题 and 挑战^[11-12],其中多条并行顶管及大断面顶管施工对周围环境的影响难以控制^[13-15]。本文依托某下穿文物保护单位(旧城郭遗址)的顶管工程,考虑顶管施工阶段主要荷载,建立三维数值分析模型,研究不等径平行圆形钢筋混凝土顶管施工对环境敏感区地表沉降的影响,为同类顶管工程施工提供借鉴。

1 不等径平行圆形混凝土顶管工程概况

某顶管工程为综合管廊项目的一部分,下穿文物保护单位(旧城郭遗址)。该工程包含 3 根不同直径的平行圆形钢筋混凝土顶管(见图 1),内径分别为

^{*} 基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20211281)

4.5 m(综合舱)、3.5 m(GIL 电力舱)、3.0 m(普通电力舱),相邻管节外壁间距分别为 4.2 m、3.6 m,管节覆土深度(以 4.5 m 为例)为 11.68~15.08 m,采用顶管施工,顶进长度约为 100 m。其中一根顶管外径 5.4 m,为现阶段国内较大直径顶管。3 根不等

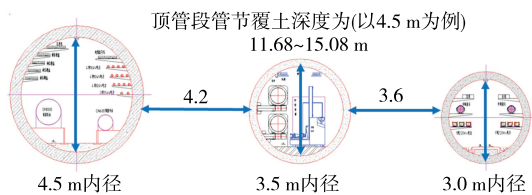


图 1 顶管剖面图(单位:m)

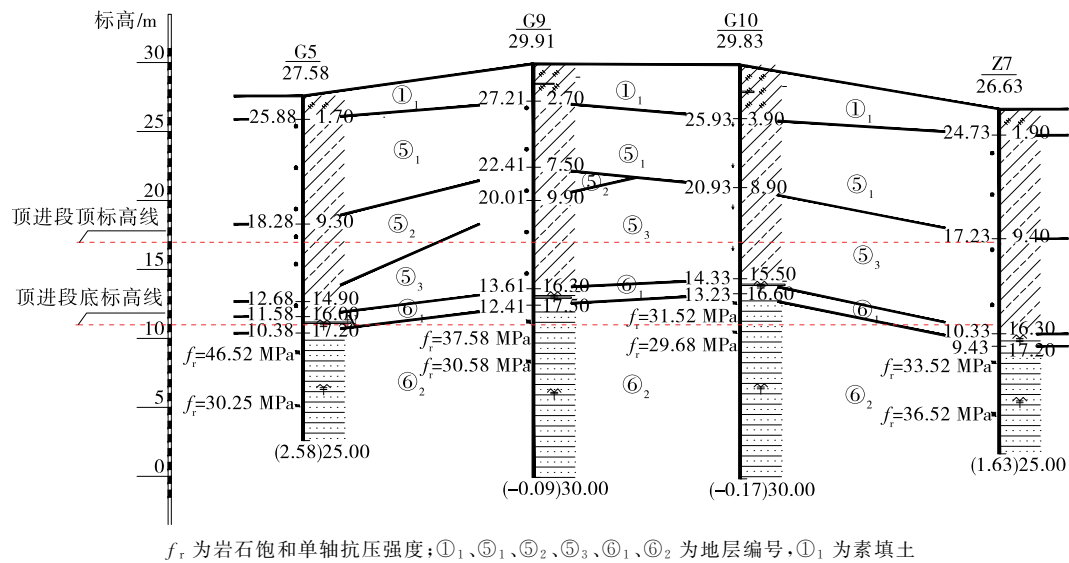


图 2 顶管区域工程地质(单位:m)

2 不等径平行圆形混凝土顶管施工对地表沉降的影响

2.1 数值模型

采用 MIDAS 软件建立该顶管工程数值分析模型,计算范围为岩土体计算区域的 4 倍,模型尺寸为 100 m×50 m×30 m。 y 方向为顶管顶进长度 100 m, z 方向为沿顶管覆土深度向下 30 m, x 方向沿顶管剖面取 50 m(见图 3)。分别定义内径 4.5 m 顶管为 1[#] 顶管,内径 3.5 m 顶管为 2[#] 顶管,内径 3.0 m 顶管为 3[#] 顶管。模型采用四面体网格进行单

元划分,为保证模型计算精度与运行速度,钢筋混凝土顶管结构单元尺寸取 1.0 m×1.0 m×1.0 m,土体单元尺寸取 2.0 m×2.0 m×2.0 m。土层参数见表 1。

该顶管工程主要穿越地层见图 2,包括粉质黏土(层号⑤₁、⑤₂、⑤₃)、强风化砂岩(层号⑥₁)、中风化砂岩(层号⑥₂),呈上软下硬分布。强风化层岩体极破碎,风化裂隙较发育;中风化层岩体同样存在风化裂隙或构造裂隙,但一般呈闭合状,且连通性差。基岩裂隙水主要赋存于基岩裂隙中,其富水性较差,透水性较弱,总体水量不大,但雨季时局部基岩裂隙水量较大。考虑到顶管下穿文物保护区,且地质情况为上软下硬,该顶管工程采用泥水平衡顶管机施工。

元划分,为保证模型计算精度与运行速度,钢筋混凝土顶管结构单元尺寸取 1.0 m×1.0 m×1.0 m,土体单元尺寸取 2.0 m×2.0 m×2.0 m。土层参数见表 1。

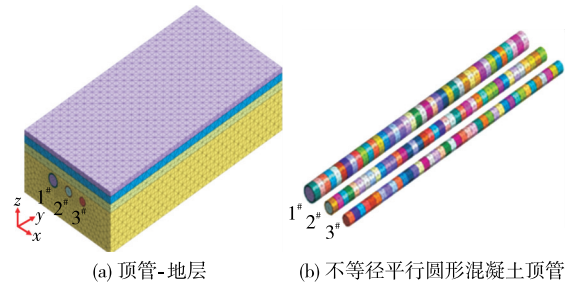


图 3 顶管工程数值分析模型

表 1 土层参数

土层	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	2.0	1 850	4.5	0.15	8	12
素填土	3.0	2 000	4.5	0.30	8	10
粉质黏土	3.5	1 900	6.0	0.30	33	30
强风化砂岩	21.5	2 100	20.0	0.26	20	15

3 根圆形钢筋混凝土顶管的单个节段长度均为 2.5 m,故 40 次顶进节段可完成每根 100 m 长钢筋混凝土顶管的顶进过程。其中,每根圆形钢筋混凝土顶管的第一节段与第二节段的模拟步骤为激活土体与围岩约束并施加自质量→进行地应力平衡→激活第一步顶管顶推力→钝化第一次开挖土体并施加第一次注浆压力与负摩阻力→激活第一节段并施加第一次千斤顶顶推力→激活第二步顶管顶推力,钝化第一步顶推力→钝化第二次开挖土体→钝化第一次注浆压力与负摩阻力及千斤顶顶推力→激活第二次注浆压力与负摩阻力→激活第二节段并施加第二次千斤顶顶推力。完成 3 根圆形钢筋混凝土顶管顶进后,将顶管周围触变泥浆层替换成水泥-水玻璃双液浆层,等代注浆层假设为弹性,其参数见表 2。计算模型采用等代层法(改变顶管周围土体模量)反映土体地层损失。

表 2 等代注浆层参数

注浆材料	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)
触变泥浆	0.1	0.2	12
水泥-水玻璃双液浆	21 000.0	0.3	20

数值模拟中,采用面压力荷载施加于等代注浆层内部作为负摩阻力(方向与顶管顶进方向相反,大小为 2.5 kPa),反映触变泥浆对顶管摩阻力的降阻作用。注浆压力作用在紧邻注浆层外表面土体内侧和管节外表面(方向为管节外表面法向),采用线压力荷载将千斤顶对管节作用施加于管片上。此外,

采用面均布压力荷载的方式将顶推力施加于开挖面,顶管推力采用《给水排水工程顶管技术规程》推荐的式(1)、式(2)进行计算^[16],得到施加于 1[#]、2[#]、3[#] 顶管的推力分别为 600 kPa、750 kPa、600 kPa。

$$F_0=\pi D_1 L f_k+N_F$$
 (1)

$$N_F=\pi/4 D_g^2 \gamma_s (H_s+D_g)$$
 (2)

式中: F_0 为管道总顶力标准值(kN); D_1 为管道外径(m); L 为管道设计顶进长度(m); f_k 为管道外壁与土的平均摩阻力(kN/m²); N_F 为顶管机的迎面阻力(kN); D_g 为顶管机外径(m); γ_s 为土的重度(kN/m³); H_s 为覆盖层厚度(m)。

设置 3 种工况,工况 1 为顺次逐个施工顶管(小直径顶管向大直径顶管依次开挖,即 3[#] 顶管→2[#] 顶管→1[#] 顶管),工况 2 为先施工中间顶管(2[#] 顶管)再同时施工两侧顶管(1[#] 与 3[#] 顶管),工况 3 为先同时施工两侧顶管再施工中间顶管,分析不等径平行圆形钢筋混凝土顶管施工对文物保护区地表沉降的影响。

2.2 结果分析

工况 1 下文物保护区地表沉降见图 4。从图 4 可看出:3[#] 顶管开挖结束时地表沉降槽以 3[#] 顶管为中心,沉降最大值为 1.39 mm;2[#] 顶管开挖使地表沉降槽中心向 2[#] 顶管偏移,2[#] 顶管开挖结束时地表沉降槽以 2[#] 顶管为中心,沉降最大值为 2.72 mm;1[#] 顶管开挖使地表沉降槽中心向 1[#] 顶管偏移,且 3[#] 顶管附近土体向上隆起(隆起值约为 0.5 mm),1[#] 顶管开挖结束时地表沉降槽以 1[#] 顶管为中心,沉降最大值为 12.01 mm。

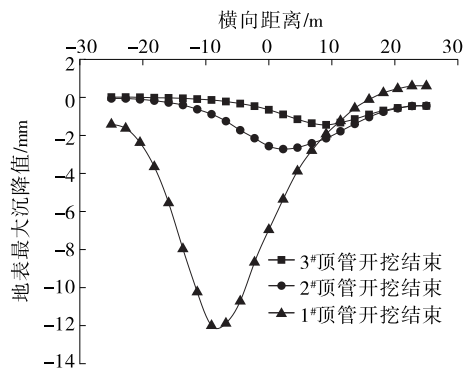
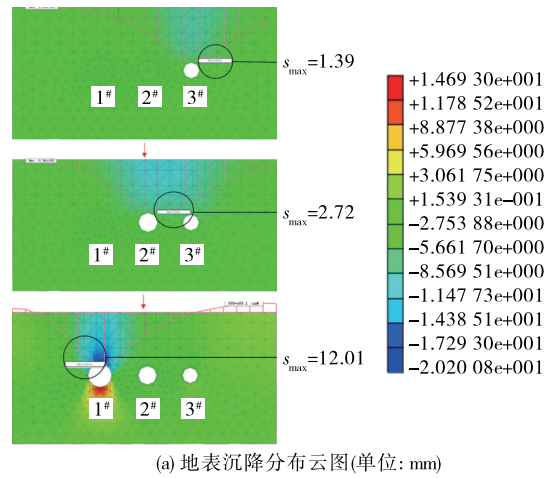


图 4 工况 1 下文物保护区地表沉降 s

工况 2 下文物保护区地表沉降见图 5。从图 5 可看出:2[#] 顶管开挖结束时地表沉降槽以 2[#] 顶管

为中心,沉降最大值为 1.99 mm;1[#] 与 3[#] 顶管同时施工,直径较大的 1[#] 顶管对周围土体的扰动占主要

因素(1[#]顶管附近沉降占主导地位),直径较小的3[#]顶管对周围土体扰动较小(3[#]顶管附近沉降较小),1[#]与3[#]顶管开挖结束时地表沉降槽以1[#]顶管为中心,沉降最大值为6.70 mm。2[#]顶管开挖对

3[#]顶管上方地表沉降影响较小,但后续的1[#]与3[#]顶管同时施工引起3[#]顶管附近土体向上隆起(隆起值约为0.5 mm)。

工况3下文物保护区地表沉降见图6。从图6

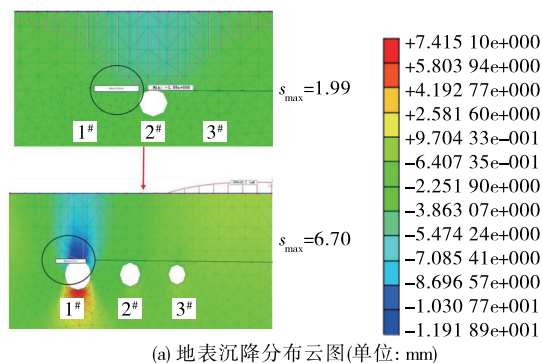


图5 工况2下文物保护区地表沉降 s

可看出:1[#]与3[#]顶管同时施工,直径较大的1[#]顶管对周围土体的扰动占主要因素(1[#]顶管附近沉降占主导地位),直径较小的3[#]顶管对周围土体扰动较小(3[#]顶管附近沉降较小),1[#]与3[#]顶管开挖结束时地表沉降槽以1[#]顶管为中心,沉降最大值为

7.05 mm;2[#]顶管开挖结束时地表沉降槽变化较小,且仍然以1[#]顶管为中心,沉降最大值为7.24 mm,相较于1[#]与3[#]顶管开挖结束时地表沉降仅增加0.19 mm,2[#]顶管开挖对周围土体扰动较小。

综上,3种工况下3根顶管施工结束时地表沉

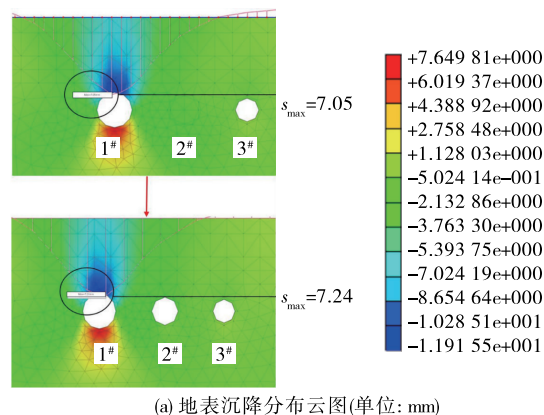


图6 工况3下文物保护区地表沉降 s

降槽均以1[#]顶管为中心,两侧顶管同时开挖对地表沉降的影响大于中间顶管开挖的影响,且外径5.4 m的1[#]顶管施工对地表沉降影响最显著。工况1、工况2、工况3对应的最终地表沉降最大值分别为12.01 mm、6.70 mm、7.24 mm,工况1对地表沉降的影响最不利,原因在于工况1对地层进行3次扰动,而工况2、工况3仅对地层进行2次扰动。可采取工况2或工况3对应的开挖方法进行顶管施工。

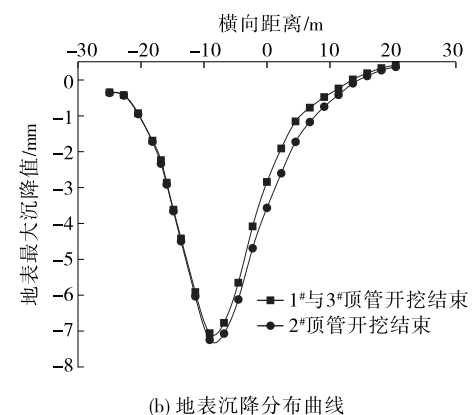
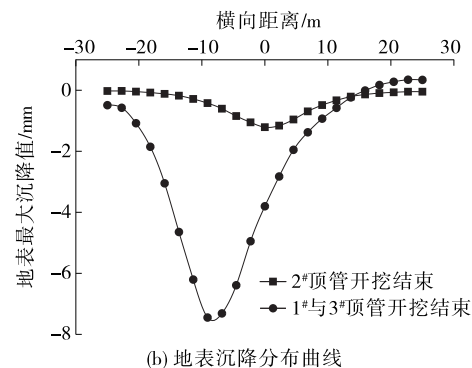
3 结论

本文以某下穿文物保护区的3根不等径平行圆

形钢筋混凝土顶管工程为背景,考虑顶管施工阶段的主要荷载,研究顶管尺寸、空间位置、施工顺序等因素对环境敏感区地表沉降的影响,主要结论如下:

(1) 顺次逐个开挖顶管、先开挖中间顶管再同时开挖两侧顶管、先同时开挖两侧顶管再开挖中间顶管3种工况下,3根平行顶管施工结束时地表沉降槽均以直径较大的1[#]顶管(外径5.4 m)为中心向两侧扩展,直径较大的1[#]顶管施工对地表沉降的影响最显著,两侧顶管同时施工对地表沉降的影响大于中间顶管施工的影响。

(2) 工况1对地表沉降的影响最为不利,对应



最终地表沉降最大值达 12.01 mm;工况 2、工况 3 对应的最终地表沉降最大值相差较小,分别为 6.70 mm、7.24 mm),可选取工况 2 或工况 3 对应的开挖方法进行顶管施工。

参考文献:

- [1] 殷湘舰,蔚宁哲,周意红.富水软弱地层中超大断面矩形顶管施工地表沉降控制技术研究[J].工程建设与设计,2021(17):114-117.
- [2] 秦林,郝欣,汪林.顶管技术在地下空间中小型管道施工中的应用[J].现代隧道技术,2022,59(增刊 2):228-233.
- [3] 韩焯,王鑫.北京地区深基坑工程引起地表沉降规律研究[J].建筑科学,2020,36(增刊 1):185-190.
- [4] 施成华,黄林冲.顶管施工隧道扰动区土体变形计算[J].中南大学学报(自然科学版),2005,36(2):323-328.
- [5] 桂林,任睿祺,史培新,等.浅埋矩形顶管施工引起的地层沉降变化规律[J].城市轨道交通研究,2022,25(12):94-100.
- [6] 黄朝焯.矩形顶管穿路施工对土体扰动变形研究与实测分析[J].施工技术,2018,47(增刊 1):761-766.
- [7] 李方楠,沈水龙,罗春泳.考虑注浆压力的顶管施工引起土体变形计算方法[J].岩土力学,2012,33(1):204-208.
- [8] 邓小钊.并行双顶管下穿高速公路桥梁安全性影响研究[J].公路与汽运,2021(3):135-139.
- [9] 夏德欣.顶管下穿公路引起道路沉降分析[J].公路与汽

运,2014(6):116-118.

- [10] 李鑫,郑爽,张永杰,等.基岩污水顶管纵向应力特性数值分析研究[J/OL].交通科学与工程,1-8[2025-03-03]. <https://doi.org/10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20240320001>.
- [11] JIANG X, ZHANG X H, WANG S, et al. Case study of the largest concrete earth pressure balance pipe-jacking project in the world[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2022, 2676(7): 92-105.
- [12] ZENG C, XIAO A F, LIU K X, et al. Experimental study on the influence of slurry concentration and standing time on the friction characteristics of a steel pipe-soil interface[J]. Applied Sciences, 2022, 12(7): 3576.
- [13] 吴列成,黄德中,邱龔.大断面矩形顶管法地铁车站施工沉降控制技术实践:以上海轨道交通 14 号线静安寺站工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(9):1585-1593.
- [14] 陈爱青.多线并行顶管穿越堤防沉降影响分析及应对措施研究[J].陕西水利,2021(6):19-21+27.
- [15] 诸岩.多孔小净距隧道施工力学特性数值模拟与现场实测研究[J].公路与汽运,2022(3):139-143.
- [16] 中国工程建设标准化协会.给水排水工程顶管技术规程:CECS 246—2008[S].北京:中国计划出版社,2008.

收稿日期:2023-07-11

《中外公路》2025 年征订通知

《中外公路》(原《国外公路》)创刊于 1980 年,双月刊,由长沙理工大学主管、主办,邮局公开发行至全国公路、市政、铁路、水利、建筑等系统和相关行业。属 RCCSE 中国核心学术期刊、首届中国高校特色科技期刊、中国高校技术类优秀期刊、中国科技核心期刊、湖南省十佳科技期刊、中国期刊全文数据库及中国核心期刊(遴选)数据库全文收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,“桥梁工程与隧道工程”栏目荣获首届(2008 年)湖南省优秀栏目,2009 年获全国高校科技期刊优秀编辑质量奖,多次被评为交通运输部、湖南省优秀期刊。

2025 年《中外公路》为大 16 开,每册定价 15.00 元,全年 6 期共 90.00 元。

邮发代号:42-63。读者也可通过邮局或银行汇款至编辑部直接订阅。

地址:长沙理工大学云塘校区 58 号信箱 邮编:410114

户名:长沙理工大学

电话:0731-85258033(带传真)

账号:1901016009109888886

联系人:白雪

收款单位:《中外公路》编辑部

开户行:工商银行长沙银迅支行

E-mail: zhongwaigonglu@vip.163.com