

DOI: 10.7672/sgjs2025220055

浅覆土软弱地层大直径顶管技术研究*

杨富强¹, 江慧², 施笋¹, 姚韦靖²

(1. 北京住总集团有限责任公司,北京 100101; 2. 安徽理工大学土木建筑学院,安徽 淮南 232001)

[摘要] 顶管掘进断面为软弱地层,不易控制顶管姿态,研发了工具管姿态可调整顶进系统,将试验段的高程偏差和中线偏差分别控制在-16~6mm和2~16mm。针对阻碍工具管切土顶进的废弃管道,研发了大直径人工顶管可伸缩式主动支护装置,为顶进前方地下障碍物的清除施工提供安全的作业空间。研究结果表明,顶管施工时地表沉降受注浆压力影响,注浆压力取0.1MPa时,地表沉降控制效果良好;沿顶管顶进方向,地表沉降位移逐渐增大并趋于稳定;沿水平方向,地表的横向位移沉降曲线呈正态分布,且顶管顶进对土体的横向扰动范围为-10~10m。顶管施工时,地面行车荷载对土层的横向位移影响不大,但加剧了土层的竖向位移,端头注浆加固可以改善土层软弱特质。

[关键词] 地下工程;顶管;软弱地层;障碍物;沉降;数值模拟;注浆压力

[中图分类号] TU990.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2097-0897(2025)22-0055-06

Research on Large-diameter Pipe Jacking Technology for Shallow-covered Weak Soil Formations

YANG Fuqiang¹, JIANG Hui², SHI Sun¹, YAO Weijing²

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

2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology,
Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of controlling the jacking attitude during the jacking process due to the weak stratum such as silt fill, fine silt and silt, a tool pipe attitude adjustable jacking system was developed to control the elevation deviation and midline deviation of the test section within -16~6mm and 2~16mm respectively. A large-diameter manual pipe jacking active retractable support device was developed to provide a safe working space for the removal of underground obstacles in front of the jacking. The numerical simulation results show that the surface settlement is affected by the grouting pressure during pipe jacking construction. When the grouting pressure is 0.1MPa, the surface settlement control effect is good. Along the jacking direction, the ground settlement displacement increases gradually and tends to be stable. The lateral displacement and settlement curve of the surface along the horizontal direction presents a normal distribution law, and the lateral disturbance range of the soil is -10 ~ 10m. During pipe jacking construction, the driving load on the ground has little effect on the lateral displacement of the soil layer, but aggravates the vertical displacement of the soil layer.

Keywords: underground engineering; pipe jacking; weak strata; obstacle; settlement; simulation; grouting pressure

0 引言

随着地下管网日益密集,新修管网在穿越既有

构筑物的复杂地层中施工已成为常态,建设中需要严格控制地表沉降量和顶管姿态。此外,顶管工程还可能遇到地下障碍物,需要清障处理。赵伟娟^[1]对下穿高速顶管施工中的关键技术和方法进行分析研究。郭平等^[2]对浅覆土中顶管姿态控制难点进行分析,并介绍了该工程采用的姿态测量、铰接

* 安徽省住房城乡建设科学技术计划(2023-YF048);安徽省博士后科研项目(2024C943);淮南市科技计划(2023A313)

[作者简介] 杨富强,高级工程师,E-mail:henry7803161@126.com

[收稿日期] 2025-04-25

纠偏、多螺旋机出土、多刀盘模式控制、注浆纠偏等多种技术结合的纠偏控制方案。罗利等^[3]为解决传统顶管技术的不足,研究了地下排水管线顶管穿越动载路面的施工方法。赵志龙^[4]详细阐述了顶管轴向测量和偏差控制技术,验证了该项技术可以应用到长距离地铁隧道顶管施工中。赵宁^[5]结合具体工程案例,基于工效比选,介绍了上海市某污水处理厂顶管突遇板桩退管拔桩施工成套技术。屈勇等^[6]综述了顶管施工障碍物的各种处理技术,并系统整理和对比分析了这些技术的原理、工艺流程、技术特点以及适用范围。舒钢强^[7]描述了矩形顶管机在某市地下通道施工中遭遇大直径、高强度石块后加设中间井、开挖基坑清障、修复顶管机机头的情况。关国轻^[8]以上海地铁 18 号线下盐路地铁站出入口矩形顶管近距离下穿给水管线施工项目为依托,通过数值计算与现场实测数据对比,分析了矩形顶管顶进施工过程中对附近地面和管线的扰动特性。李江^[9]以东莞某输水工程为背景,研究了软土地区钢顶管施工引起的地表变形规律。李东风等^[10]为有效控制郑州市某浅覆土下穿隧道大断面顶管施工过程中的地层沉降,对顶管施工引起地表变形的机理和变形规律进行分析。胡政等^[11]以顶管穿越地铁隧道、高速路基为例,从控制地铁隧道、路基竖向变形为要点,采用 MIDAS 有限元软件进行数值模拟。段超杰等^[12]依托郑州市地铁 8 号线龙王庙站污水管道改迁工程,通过对区间 11 中工作井 W-12~W-13 范围内的顶管施工引起地表沉降进行分析研究,得出了郑州地区顶管下穿城市道路引起的地表沉降规律。上述文献对顶管法顶进姿态控制、顶管清障技术以及地表沉降控制均有涉及,但对同一个工程既需要进行顶管法顶进姿态、地表沉降控制又遇障碍物要进行清障处理的案例则不多见。本文结合北京市广渠路东延道路雨水管线工程,阐述大直径人工顶管姿态预控制技术、顶管施工遇地下障碍物的清障方法和地表沉降影响规律。

1 工程概况

北京市广渠路东延道路工程四标段雨水管线工程部分井段采用人工手掘式顶管法施工,管材为 3m 大直径钢筋混凝土管,其中工作井~接收井顶程为 82.5m,穿越土层为①粉土素填土层、②₁ 粉质黏土层、②₂ 细砂~粉砂层、②₃ 粉土层,覆土深 2.9~3.06m。

工程施工难点:①大直径人工顶管姿态控制,掘进断面土体自稳定性差,管道自重大,周围地质情况极易对顶管姿态产生重要影响,会导致工具管扎

头,管道偏差较大,不易纠偏;②废弃管道清障处理,根据管线调查资料,顶管断面范围内存在位置相交、斜交的废弃 φ800PE 管和 φ600 污水管,阻碍工具管切土顶进,由于地下障碍物清除时需要一定的安全作业空间,同时清障期间需防止上部土体塌落,废弃管道清障处理困难;③人工顶管管顶覆土厚 2.9~3.06m,小于常规顶管覆土厚度为管径 1.5 倍的要求,同时在顶进过程中,需穿越现况导行路,早晚高峰车流量大,施工安全威胁较大。

2 大直径人工顶管姿态控制技术

2.1 姿态可主动调整式顶进系统设计

姿态可主动调整式顶进系统分为前段和后段,前段主要由工具管帽檐组成,后段主要由套管、密封刷和接力顶组成,如图 1 所示。工具管帽檐外径为 3 640mm,内部设置支撑肋板和分隔板。工具管与套管外壳搭接部位增设环向橡胶圈,以防外侧土体进入工具管内。套管总长 3m,中间设加强肋板,尾部末端与混凝土管材搭接部位增设 2 道钢制密封刷,防止触变泥浆进入工具管内。套管前端设有液压铰接千斤顶与工具管连接,千斤顶环向均匀布置 4 处;套管尾部设置 4 组 8 个 50t 液压千斤顶,顶管顶进时在中间节与混凝土管间放置护口铁,作用在护口铁上可提供向前顶进的顶力。

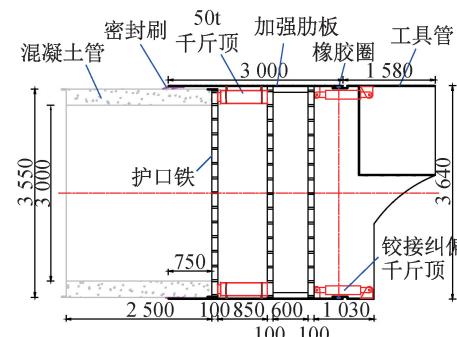


图 1 姿态可主动调整式顶进系统

Fig. 1 Active attitude adjustment jacking system

该套大直径人工顶管姿态控制装置先利用前端铰接千斤顶进行姿态调整,锁死千斤顶,然后通过尾端液压千斤顶进行顶进,以工具管调整好的整体姿态向前顶进,每步进尺 30~50cm,最后通过后背千斤顶将混凝土管与套管尾端顶进严密。此项装置姿态可调角度为 2°,轴线调整范围约 58mm。

2.2 混凝土管节姿态固定装置

在顶管顶进进入洞后,将前 4 节钢筋混凝土管材通过[10 拉紧联系,槽钢与管道注浆孔通过高强螺栓固定,使其形成整体。混凝土管节拉紧联系如图 2 所示。顶管与[10 拉紧固定点间隔布置,以便在

顶管管外进行注浆,同时在进行姿态调整时拆除拉紧装置。

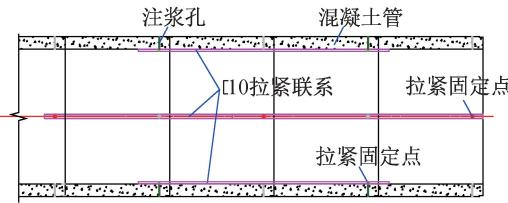


图 2 混凝土管材拉紧联系布置纵断面

Fig. 2 Layout profile of concrete pipe tensioning connection

2.3 人工顶管地下可伸缩式主动支护装置

根据工具管的结构特点,在顶部 120° 内侧设置 T 形钢板槽道,内部设置 15mm 厚可伸缩钢护板,钢板尾端设置千斤顶托板,工具管尾端设置千斤顶钢托板。当遇到障碍物时,安装液压千斤顶,将非障碍物位置的清障护土钢板向前顶伸,最大顶伸量约 40cm,留出安全操作空间,防止外侧土体坍塌,如图 3 所示。

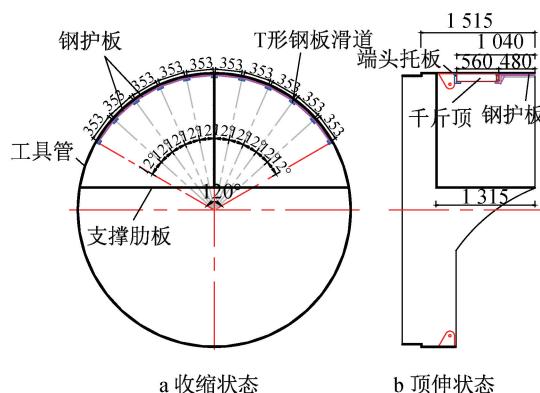


图 3 可伸缩护土钢板

Fig. 3 Retractable retaining steel plate

3 数值模拟

3.1 模型尺寸

使用 MIDAS 有限元软件建立顶管施工三维数值模型。考虑软件计算时的边界效应影响^[13-14],确定几何尺寸为 $100\text{m} \times 60\text{m} \times 40\text{m}$,顶管管顶覆土厚度取平均厚度 3m。工具管外径 3 640mm;顶管为钢筋混凝土管,外径 3 550mm,内径 3 000mm,横断面为圆形;管节外侧的泥浆套用 50mm 厚的等代层代替。

3.2 本构模型及材料参数

土体模拟采用莫尔-库仑弹塑性模型。管节采用预制钢筋混凝土材料,本构模型采用线弹性本构模型。计算中考虑注浆材料填充,将隧道周围土层与浆液的混合体等代为弱化土层,即等代层模拟地层损失。物理力学参数如表 1 所示。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of material

名称	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
渣土	1.85	5.0	0.20	0	10.0
粉土素填土	1.75	7.5	0.25	8	10.0
细砂-粉砂	1.95	15.0	0.30	0	25.0
粉土	1.89	7.2	0.30	19	22.1
细砂	2.00	30.0	0.35	0	30.0
粉质黏土	1.99	9.8	0.35	35	12.0
混凝土管节	2.50	20 000	0.20	—	—
工具管	7.85	200 000	0.20	—	—
注浆等代层	1.07	4.0	0.35	—	—

3.3 模拟结果分析

3.3.1 不同注浆压力作用下的地表沉降

注浆压力取值分别选 0(无注浆压力)、0.05MPa(1 倍覆土压力)、0.1MPa(2 倍覆土压力)、0.15MPa(3 倍覆土压力)、0.2MPa(4 倍覆土压力)、0.25MPa(5 倍覆土压力)^[15]。顶管施工过程中,无注浆压力和有注浆压力时,土层的竖向位移最大值均位于始发端管顶正上方,地表最大沉降均为始发洞口上方,不同注浆压力作用下的土层竖向位移和地表沉降最大值如表 2 所示。

表 2 不同注浆压力作用下的位移

Table 2 Displacements under different grouting pressures

注浆压力/MPa	土层竖向位移最大值/mm	地表沉降最大值/mm
0	44.476	23.133
0.05	43.703	22.700
0.10	42.927	22.262
0.15	42.145	21.828
0.20	41.361	21.406
0.25	40.577	20.999

顶管施工完成后,取 $y=22\text{m}$ 处横向地表作为观测面,贯通后不同注浆压力下纵向地表沉降曲线如图 4 所示,贯通后不同注浆压力下 $y=22\text{m}$ 处横向地表沉降曲线如图 5 所示。

由图 4,5 可知,随着注浆压力的增大,地表沉降逐渐减小。地表横向沉降曲线符合正态分布,且顶管两侧地表土体存在隆起现象。

3.3.2 行车荷载作用下的地表沉降

顶管顶进施工会下穿双向四车道,单车道宽 3.5m,车流量较大,由于顶管覆土较浅,为保证顶管下穿道路施工能够安全顺利进行,在上述模型计算基础上,考虑道路行车荷载作用,按照 JTG B 01—2014《公路工程技术标准》,荷载值取 $1.856 \times 10^4 \text{Pa}$ 。为简化模型,沿模型长度方向取中间 20m 为行车道路,行车荷载按均匀布荷载考虑。在注浆压力为

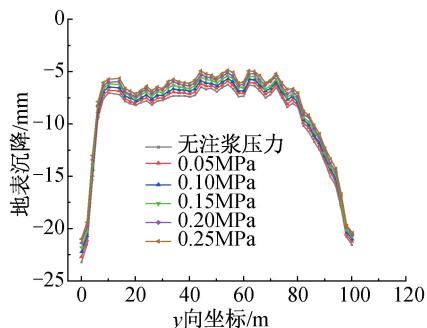


图 4 不同注浆压力下的纵向地表沉降

Fig. 4 Longitudinal surface settlement under different grouting pressures

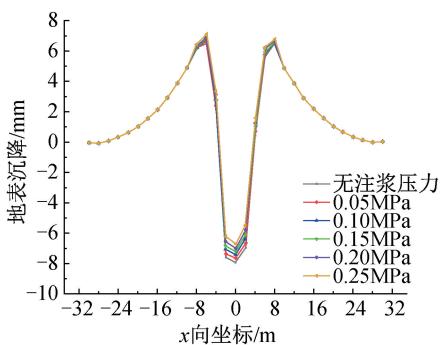


图 5 不同注浆压力下的横向地表沉降

Fig. 5 Transverse surface settlement under different grouting pressures

0.1 MPa 的模型基础上,施加 18.56 kPa 的行车荷载。由数值模拟结果可知,行车荷载作用下,土层竖向位移最大值为 42.952 mm,地表最大沉降为 22.168 mm,位于始发洞口上方,与原模型计算结果相差不大。顶管顶进过程中,管节两侧土体在顶管的挤压下发生膨胀变形,最大水平位移为 29.955 mm,且横向位移变形以管轴为中心呈对称分布。

取贯通后(顶进 100 m 时), $y=50$ m 处横向地表作为观测面,行车荷载对地表沉降的影响如图 6 所示。

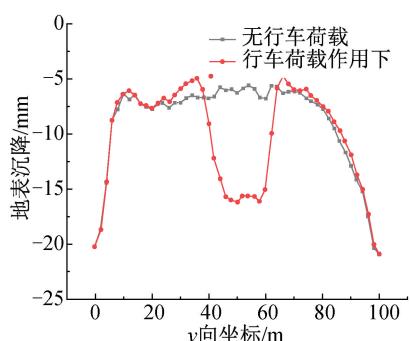


图 6 行车荷载对地表沉降的影响

Fig. 6 Impact of vehicle loads on ground settlement

由图 6 可知,施加行车荷载作用后,非过路段地表沉降相差不大,但过路段地表沉降值明显增大,差值达 9 mm 左右,且道路两侧土体产生隆起位移,道路中间呈塌陷状。道路行车荷载对土层的横向位移影响不大,主要体现在对竖向位移的影响。

3.3.3 端头注浆加固作用下的地表沉降

顶管施工时端头位置始终是薄弱点,为保证顶管安全顺利顶进,对顶管始发及接收洞口采用注浆加固措施。端头注浆加固的范围为始发端与接收端,加固长度分别为 6,8 m, 横截面沿顶管外径向外加固 3 m。利用 MIDAS 有限元软件对端头注浆加固效果进行分析,土体密度为 2.1 g/cm^3 , 弹性模量为 80 MPa, 泊松比为 0.3, 重度为 21 kN/m^3 , 黏聚力为 40 kPa, 内摩擦角为 35° 。

端头注浆加固后,土层沉降最大值为 19.248 mm,沉降值明显减小,最大沉降点为道路中央管顶上方;地表沉降最大值为 17.352 mm,位于过路段位置;端头位置均无沉降现象,且由于顶管顶进时土体的挤压效应,始发端头与接收端头均有轻微隆起。加固后土体的横向变形规律与模型一致,以管轴为中心呈对称分布,但横向位移大幅减小。

综上所述,顶管施工时,注浆压力是地表变形控制的关键影响因素,建议设置为 0.1 MPa,即 2 倍上覆土压力为宜。顶管施工时,地面行车荷载对土层的横向位移影响不大,但加剧了土层的竖向位移,对地表沉降量控制不利。顶管贯通后,两端端头位置地表沉降均较大,是位移控制的重点,过路段位置地表沉降呈中间凹陷、道路两侧土体隆起的趋势,现场实际施工时,对过路段顶进应采取必要的保护措施,严格控制地层沉降。端头注浆加固可以改善土层软弱特质,有效抑制地层沉降,防止端头坍塌现象,但由于本工程过路段距离端头很远,因此端头加固对过路段地层沉降影响不大。

4 试验段顶进施工

4.1 试验段范围

在围挡区域内选择一定顶进距离进行试验段施工,根据现场实际情况,试验段拟定设置长度为 30 m。试验段的地层主要分布①₁ 渣土层、① 粉土素填土层、②₁ 粉质黏土层、② 细砂~粉砂层、②₂ 粉土层,掘进断面范围内无地下水。

4.2 试验段主要参数

1) 初始顶进挖土 $\leq 30 \text{ cm}/\text{次}$, 始终保证工具管管帽先切入土体 10 cm, 严禁超挖。

2) 泥浆配制优选颗粒细、胶质较高的膨润土,在制作过程中,搅拌充分均匀,触变泥浆指导配合

比为膨润土 $80\sim100\text{kg}/\text{m}^3$, 水 $600\sim1\,000\text{kg}/\text{m}^3$, 碱 $1\sim2\text{kg}/\text{m}^3$ 。

3) 在顶管进出洞口位置对土体进行注浆加固, 采用地面深孔注浆方式, 注浆范围为管道外侧 3m, 注浆管长 5m, 注浆断面为 $9.55\text{m}\times9.55\text{m}$, 注浆孔采用梅花形布置, 浆液为水泥水玻璃双液浆, 注浆压力控制在 $0.4\sim0.6\text{MPa}$ 。

4.3 试验结果分析

4.3.1 顶进姿态

根据监测工具管轴线及高程偏差情况, 并结合工具管的前进姿态变化情况, 及时利用工具管铰接千斤顶进行纠偏, 使工具管不出现较大偏差。试验段的高程偏差为 $-16\sim6\text{mm}$, 中线偏差为 $2\sim16\text{mm}$, 满足规范及设计要求, 因此利用工具管的铰接千斤顶进行姿态控制, 保证顶管掘进过程中位置、角度等的准确性。

4.3.2 地表沉降

试验段顶进结束后(即顶进 30m 位置), 不同监测断面的地表沉降曲线及管道中线位置(监测点 5)如图 7,8 所示。

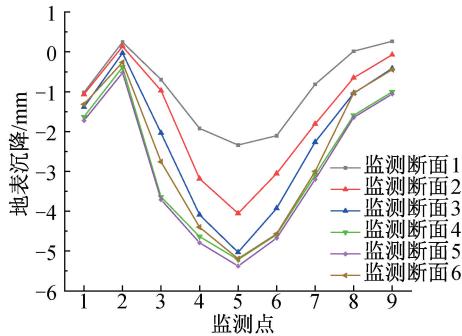


图 7 不同监测断面的地表沉降曲线

Fig. 7 Surface settlement curves of different monitoring sections

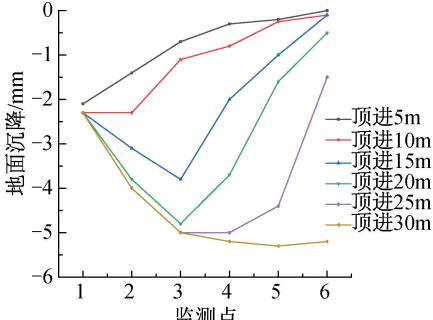


图 8 管道中线位置在不同顶进阶段的地表沉降曲线

Fig. 8 Surface settlement curve of the pipeline center line in different jacking stages

顶进 30m 后, 监测断面 1~5 地表沉降都已趋于稳定, 监测断面 6 还在变化中, 监测断面 3~5 的沉

降稳定值为 5.5mm 左右, 与数值模拟结果基本一致。工作面的地表沉降速度较快, 工作面前方土体随着开挖进行出现微沉降, 工作面后方土体随着顶管向前顶进沉降值逐渐增大并最终趋于稳定, 且稳定在 5.5mm 左右, 说明试验段采用的注浆压力、顶进速度、触变泥浆配合比等参数合理有效, 保浆措施即管尾密封刷密封效果显著, 浆液起到良好的润滑和支撑作用, 对顶管施工过程中地表沉降有良好的控制作用。

5 结语

通过在工具管管尾设置环形密封刷、密封刷中间涂抹油脂的方法, 解决了管尾与混凝土管接口处易漏浆的问题, 减小顶管顶进过程中的摩阻力, 同时有效降低了顶管顶进过程中的地表沉降。设计的可伸缩式主动支护装置, 为安全、高效地清除前方地下障碍物提供了有效的作业空间。通过数值模拟与试验段验证, 明确了地表沉降随注浆压力增大而减小, 并确定 0.1MPa 为最优注浆压力。研究成果为类似复杂地层条件下的顶管施工提供了可靠的技术借鉴与实践依据。

参考文献:

- [1] 赵伟娟. 粉土地层顶管下穿高速施工关键技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2023(23):172-174.
ZHAO W J. Study on key construction technology of pipe jacking underpass highway in silty soil [J]. Construction & design for engineering, 2023(23):172-174.
- [2] 郭平, 李茂, 陈建航, 等. 超大断面矩形顶管姿态控制关键技术研究 [J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(7):32-35.
GUO P, LI M, CHEN J H, et al. Research on key technology of attitude control of super-large section rectangular pipe-jacking tunnel [J]. Guangdong architecture civil engineering, 2024, 31(7):32-35.
- [3] 罗利, 刘卫华, 童龙伟, 等. 排水管道顶管下穿城市动载道路施工技术探讨——以什邡地区工程为例 [J]. 科技和产业, 2024, 24(13):265-270.
LUO L, LIU W H, TONG L W, et al. Discussion on construction technology of drainage pipe jacking under urban dynamic load road:taking the engineering in Shifang area as an example [J]. Science technology and industry, 2024, 24(13):265-270.
- [4] 赵志龙. 长距离地铁隧道顶管轴向测量和偏差控制技术研究 [J]. 工程机械与维修, 2024(1):189-191.
ZHAO Z L. Research on axial measurement and deviation control technology of pipe jacking in long-distance subway tunnel [J]. Construction machinery & maintenance, 2024(1):189-191.
- [5] 赵宁. 大直径顶管近穿既有运行箱涵加固及清障施工技术 [J]. 中国市政工程, 2024(3):72-76, 156.
ZHAO N. Construction technology for reinforcement & obstacle removal of large diameter pipe jacking near existing operating box culvert [J]. China municipal engineering, 2024(3):72-76, 156.
- [6] 屈勇, 胡晓萌, 赵阳森, 等. 顶管施工障碍物处理技术综述

- [J]. 人民长江,2018,49(21):77-83.
- QU Y, HU X M, ZHAO Y S, et al. Introduction of obstacle treatment technology in pipe jacking[J]. Yangtze river,2018,49(21):77-83.
- [7] 舒钢强. 矩形顶管机施工中遇到的障碍及清障技术[J]. 中国市政工程,2010(4):66-68,85.
SHU G Q. On the obstacle and obstacle clearing technique during the operation of rectangular pipe-jacking machine [J]. China municipal engineering,2010(4):66-68,85.
- [8] 关国轻. 矩形顶管近距离下穿给水管线变形控制技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(12):71-75.
GUAN G Q. Deformation control technology of rectangular pipe jacking through water supply pipeline at close distance [J]. Construction technology,2024,53(12):71-75.
- [9] 李江. 软土地区钢顶管施工引起的地表变形规律[J]. 西安科技大学学报,2023,43(6):1149-1157.
LI J. Ground deformation law of steel pipe jacking construction in soft soils [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2023,43(6):1149-1157.
- [10] 李东风,杜一飞,马苗苗. 大断面顶管引起浅覆地表变形的有限元分析[J]. 北京测绘,2023,37(7):949-953.
LI D F, DU Y F, MA M M. Finite element analysis of shallow stratum surface deformation caused by large section pipe jacking [J]. Beijing surveying and mapping,2023,37(7):949-953.
- [11] 胡政,张杰. 顶管穿越既有变形敏感构筑物的影响分析[J]. 江苏建筑,2023(3):73-76,122.
HU Z, ZHANG J. Influence analysis of pipe jacking crossing existing deformed sensitive structures [J]. Jiangsu construction,2023(3):73-76,122.
- [12] 段超杰,蒋晓天,于飞. 顶管下穿城市道路地表沉降规律分析[J]. 工程勘察,2023,51(5):35-39.
DUAN C J, JIANG X T, YU F. Analysis of surface settlement law of pipe jacking under urban road [J]. Geotechnical investigation & surveying,2023,51(5):35-39.
- [13] 陈月香,方欣欣,徐萍,等. 矩形顶管施工参数对地表沉降影响分析及控制[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2023,39(5):576-582.
CHEN Y X, FANG X X, XU Q, et al. Analysis and control of influence of rectangular pipe jacking construction parameters on surface settlement [J]. Journal of Harbin University of Commerce (natural sciences edition),2023,39(5):576-582.
- [14] 李荣伟,潘兴军. 砂土地基顶管稳定性分析及施工技术[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(S1):29-32.
LI R W, PAN X J. Stability analysis and construction technology of pipe jacking in sandy soil foundation [J]. Journal of China Three Gorges University (natural sciences),2019, 41 (S1): 29-32.
- [15] 刘钧,张剑锋,龚湘源,等. 基于不同注浆效果的环境变形影响三维数值分析[J]. 工程技术研究,2024,9(9):37-39.
LIU J, ZHANG J F, GONG X Y, et al. Three-dimensional numerical analysis of environmental deformation effect considering different grouting effects [J]. Engineering and technological research,2024,9(9):37-39.

(上接第 11 页)

- [7] COSTA P A, CALÇADA R, CARDOSO A S. Influence of train dynamic modelling strategy on the prediction of track-ground vibrations induced by railway traffic [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of rail and rapid transit,2012,226(4):434-450.
- [8] WETTSCHURECK R G. Measures to reduce structure-borne noise emissions induced by above-ground, open railway lines [J]. 1997.
- [9] 耿传智,廖志军. 地铁振动衰减特性研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2009,37(3):344-348,368.
GENG C Z, LIAO Z J. Research on attenuation characteristics of subway vibration [J]. Journal of Tongji University (natural science),2009,37(3):344-348,368.
- [10] 由广明,刘维宁. 交叠车站与区间隧道列车振动对环境的影响[J]. 北京交通大学学报,2005,29(4):40-44.
YOU G M, LIU W N. Environmental vibrations induced by trains' passages through overlapping station and tunnels [J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2005,29(4):40-44.
- [11] 邓飞皇,莫海鸿,曾庆军. 地铁运行振动诱发地层和地表动力响应分析[J]. 科学技术与工程,2007,7(3):348-351.
DENG F H, MO H H, ZENG Q J. Analysis of dynamic response of stratum and ground induced by metro operating [J]. Science technology and engineering,2007,7(3):348-351.
- [12] YANG Y B, HUNG H H. A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations [J]. International journal for numerical methods in engineering,1997,40(20):3729-3747.
- [13] 朱玉星. 地铁运行激励下土层振动的有限元分析与隔振研究[D]. 上海:同济大学,2007.
ZHU Y X. Finite element analysis and isolation study of soil vibration under subway operation excitation [D]. Shanghai:Tongji University,2007.
- [14] 陈兆玮,徐鸿,尹镪,等. 地铁诱发 TOD 建筑群振动及二次噪声控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(7):63-68.
CHEN Z W, XU H, YIN Q, et al. Control of metro-induced vibration and secondary noise of TOD building group [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition),2023,51(7):63-68.