

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.10.028

# 砂砾地层矩形截面管廊顶管施工超挖空洞消除方法

刘琳<sup>1</sup>, 刘勇<sup>2</sup>, 王树人<sup>3</sup>

(1. 江苏联合职业技术学院 南京工程分院, 江苏 南京 210000; 2. 南京市市政工程质量安全监督站, 江苏 南京 210036; 3. 南京同力建设集团股份有限公司, 江苏 南京 210046)

**摘要:** 包头市某矩形截面综合管廊需下穿市内某主干道, 下穿段管廊位于复杂砂砾地层中, 采用顶管法施工初期地下出现较大超挖空洞。在实地调查、分析施工参数基础上, 采用原因关联分析方法找出土压表被砂石堵塞、减摩泥浆在土体中流失以及改良泥浆配合比不适用这三个主因。通过比选, 采取为顶管设备增配全断面土压监测系统、采用注浆设备向管节外部注入浓泥稠浆形成不透水“泥壳”、调整膨润土泥浆配合比等应对措施, 成功在后续顶进施工过程中消除了地下超挖空洞, 现场顶管上方土体沉降观测结果均满足限定要求。

**关键词:** 砂砾地层; 综合管廊; 矩形顶管; 超挖空洞; 土体改良泥浆

**中图分类号:** TU113.5+47 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)10-0154-06

## An Eliminating Method of Over-excavated Holes in Pipe-jacking Construction of Utility Tunnel with Rectangular Cross-section in Gravel Stratum

LIU Lin<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>2</sup>, WANG Shu-ren<sup>3</sup>

(1. Nanjing Engineering Branch of Jiangsu Union Technical Institute, Nanjing 210000, China;  
2. Nanjing Municipal Engineering Quality and Safety Supervision Station, Nanjing 210036, China;  
3. Nanjing Tongli Construction Group Co. Ltd., Nanjing 210046, China)

**Abstract:** A rectangular cross-section utility tunnel which cross a main road in Baotou is located in a complex sand gravel stratum, and large underground over-excavated holes appear at the initial construction stage by pipe-jacking construction. Based on field investigation and analysis of construction parameters, three main reasons including the clogging of pressure gauge by sand gravel, the loss of anti-friction mud in soil and the inapplicability of modified mud mix ratio are found by means of cause correlation analysis. By comparison, corresponding measures are taken, such as adding whole section earth pressure monitoring system to the pipe jacking equipment, injecting thick mud into the external pipe sockets by mud injection equipment to form a impermeable “mud shell”, and adjusting the mix ratio of bentonite mud. The underground over-excavated holes have been eliminated in the subsequent pipe-jacking construction process successfully, and the field observation results of soil settlement have met the requirements.

**Key words:** gravel stratum; utility tunnel; rectangular pipe jacking; over-excavated holes; soil modified mud

矩形顶管施工技术因具有不开挖地面、不封闭交通、低噪声、无扬尘以及对周边土体扰动小等优点

而被广泛应用于地铁出入口通道、地下过街通道、管廊、箱涵等工程。矩形顶管施工需要根据地层条件

选择相适应的顶管设备、严格控制各项顶管参数、减摩注浆、测量纠偏,以最大程度减小对周边土体的扰动,控制地面沉降,防止土体变形过大影响地下管线以及周边建筑物安全。围绕这些问题,许多专家学者开展了一系列卓有成效的研究工作<sup>[1-4]</sup>。但是,有关砂砾地层矩形顶管的相关问题研究却很少。砂砾地层与常规的淤泥、黏土、砂土等单一地层不同,地层整体相对松散、空隙较大,表现出极强的不稳定性。根据文献<sup>[5]</sup>,在砂砾地层中进行矩形顶管施工面临着如下问题:①砂砾地层自稳能力较差,顶管机前置刀盘切削作业打破原土层的平衡状态,引起地层损失,进而引发流砂或土体坍塌;②密实砂卵石地层的塑流性差,土舱内的传感器较难真实反映实际工作压力(容易被堵塞),开挖面难以保持稳定,对渣土改良提出了挑战;③空隙较大,触变泥浆流失严重;④与其他地质条件相比,摩擦阻力较大,纠偏难度大。

依托包头市某综合管廊工程下穿段矩形顶管工程案例,针对如何解决复杂砂砾地层中矩形顶管工程施工出现较大超挖空洞的问题进行了研究,可为复杂砂砾地层中类似矩形顶管工程施工提供参考。

## 1 工程概况

包头市某单舱结构综合管廊(设计供热、给水、燃气3种管线入廊)需下穿市内某主干道,下穿段管廊为矩形截面,全长64.8 m,埋深5 m,横断面净空尺寸为3.3 m×5.5 m,采用4.3 m×6.5 m多刀盘土压平衡式矩形顶管机进行掘进施工,顶进坡度为0.3%(见图1)。

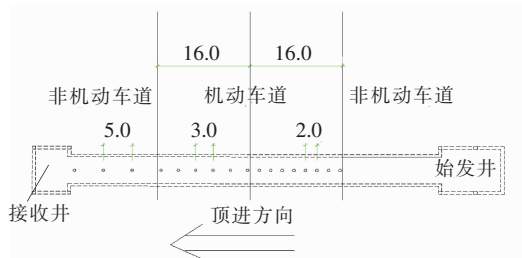


图1 施工平面位置(含顶管上方土体沉降观测点平面布置)

Fig. 1 Construction plane (including layout of soil settlement observation points above pipe jacking)

### 1.1 工程地质条件

本次矩形顶管所在土层较为复杂,开挖面主要位于圆砾层,下部为少量粉质黏土,冻雨季节初见水

位为地下9 m。圆砾层主要由卵石与砂组成,无黏性土,含水量极低,塑流性差。顶进区间地质分布如图2所示。

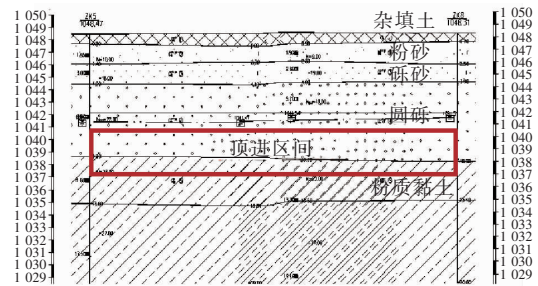


图2 顶进区间地质分布

Fig. 2 Geological distribution of jacking section

### 1.2 顶管机选型

矩形顶管机采用三大三小多轴组合式刀盘,大、小刀盘均前后错开,刀盘的经验切削有效面积约占94%。顶管机的顶进动力装置由14个千斤顶油缸组成,总顶进动力为27 440 kN(2 800 t),每个千斤顶行程3 500 mm。施工时土压力监测依靠均匀分布在顶管机隔仓板上的6个隔膜式土压表,观测数据显示在机头后部中心的仪表盘上。

## 2 地下空洞调查及成因分析

顶管机出洞之日起,顶进第7天(总顶进17.5 m)即发现顶管机及管节上部出现较大的地下空洞。

### 2.1 地下空洞情况调查及处理

经现场调查,地下空洞分布如图3所示。

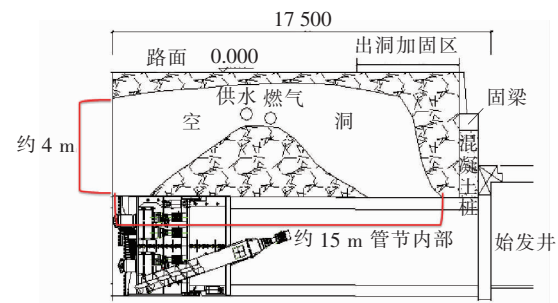


图3 地下空洞断面示意

Fig. 3 Section diagram of underground cavity

地下空洞总体沿着顶进轴线方向呈长条形分布,宽度与机头及管节的宽度基本一致,在空洞的东侧可以看到机头的顶部,空洞的西侧可以清楚看到预制管节的顶部,空洞的中部由于两条地下管线的存在,对上层土体起到了支撑作用,使该部位的土体没有全部流失,形成了一个土堆。地下空洞理论计算体积为175 m<sup>3</sup>,顶管施工记录统计的实际超挖量

为  $170 \text{ m}^3$ , 两者数值基本一致。因此, 可判定地下空洞的形成主要是由超挖造成的。

由于空洞主要分布在人行道及非机动车道下方, 现场拆除侧分带临时导行交通分流至快车道, 采用明挖浇筑 C20 混凝土的方式消除顶管上方土层产生的早期空洞, 尽快消除安全隐患。

## 2.2 顶管施工参数调查

通过调查分析, 发现由于土压力观测值过大 (表盘观测值多在  $0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$ , 部分表盘读数甚至高达  $0.4 \sim 0.5 \text{ MPa}$ , 比理论计算土压力  $0.02 \sim 0.06 \text{ MPa}$  高 10 倍之多, 理论土压力计算方法参照文献<sup>[6]</sup>)、顶进动力过大、刀盘过载等一系列因素的影响, 在顶管施工过程中制造了一种“土压平衡”假象, 导致顶进过程中排土过量, 进而最终形成超挖。

对施工过程中出现的各项问题进行统计, 如图 4 所示。可以看出, 土压力显示异常与顶进动力过大两个因素占累计百分比的 89.97%, 是导致超挖的主要原因。

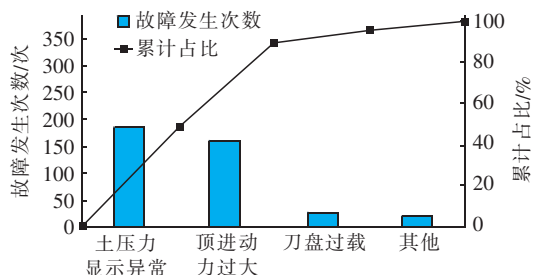


图 4 施工过程中出现的问题统计

Fig. 4 Statistics of problems occurred in the construction process

## 2.3 空洞成因分析

通过前期现状调查、大量资料整理和收集以及充分研讨后, 总结出本次矩形顶管工程施工过程中

有可能导致土压力观测值过大以及总顶力过大的多条原因, 并编制原因分析关联图 (见图 5)。

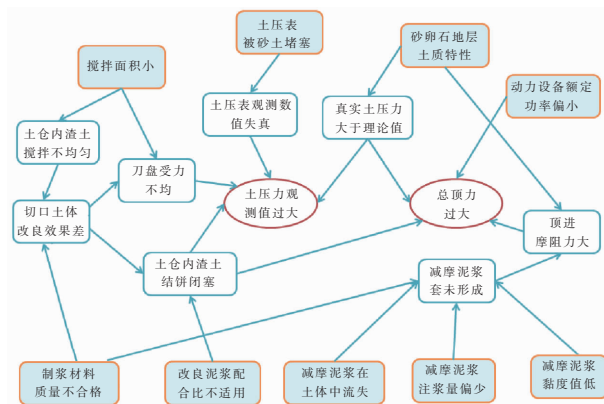


图 5 原因分析关联图

Fig. 5 Cause analysis association chart

经过对土压力观测值过大以及总顶力过大原因的分析, 共找出 9 条末端因素。通过对末端因素的逐条确认, 确定导致症结问题的主要原因如下:

### ① 土压表被砂石堵塞

由于原顶管设备 6 个隔膜式土压表在顶进过程中易被砂石堵塞, 进而导致土压力监测装置失效。

### ② 减摩泥浆在土体中流失

由于减摩泥浆在砂卵石地层中流失严重, 导致顶管外壁的减摩泥浆套始终无法形成, 从而使顶管摩阻力很大。

### ③ 改良泥浆配合比不适用

由于土体改良泥浆配合比不适用, 导致开挖面土体改良效果不佳, 引起土仓及刀盘上的渣土在高温高压的作用下结饼闭塞, 从而引起一系列不良后果。

## 3 制定对策及实施

针对以上问题, 提出如表 1 所示的对策。

表 1 原因分析及对策

Tab. 1 Cause analysis and countermeasures

问题	对策	目标	措施
土压表被砂石堵塞	为顶管设备增配全断面土压监测系统	观测土压处于 $0.02 \sim 0.06 \text{ MPa}$	①安装全断面土压测量系统; ②试顶进过程中验证土压力监测是否准确
减摩泥浆在土体中流失	采用注浆设备向管节外部注入黏土稠浆	总顶力降低 30%	①选择合适注浆材料及设备; ②选择黏土泥浆配合比; ③试顶进验证注浆效果
改良泥浆配合比不适用	采用膨润土泥浆, 调整泥浆配合比	改良土体使坍塌度 $< 8 \text{ cm}$	①通过实验室试验调整土体改良泥浆配合比; ②现场拌制泥浆、现场进行试顶进

### 3.1 增配全断面土压监测系统

#### ① 安装全断面土压测量系统

经过比选, 选择在顶管设备上增设全断面土压力测量系统, 该系统安装在顶管机四周 14 个纠偏油

缸上,通过纠偏油缸上增设的测压油管,将油压转换为全断面土压力,并将转换后的土压数值反映到操作台显示屏上。

## ② 试顶进过程中验证土压力监测是否准确

全断面土压力测量系统安装完成后,先进行调试,后续进行试顶进,并且在试顶过程中随机记录24个时点观测到的全断面土压力,绘制曲线如图6所示。

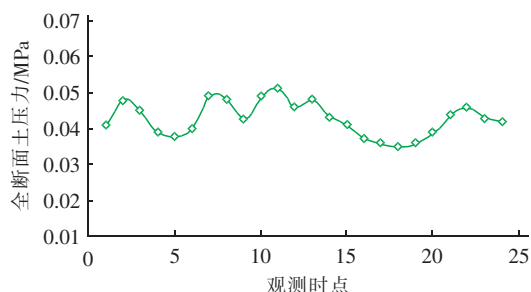


图6 全断面土压力观测曲线

Fig. 6 Full section earth pressure observation curve

由图6可以看出,该监测装置观测到的全断面土压力均处于理论计算的0.02~0.06 MPa之间,达到了对策目标的要求。

## 3.2 采用注泥设备向管节外部注入黏土稠浆

### 3.2.1 选择合适的注泥材料及设备

通过对策比选,决定采用向顶管外壁注泥的方法,使矩形顶管管节与砂卵石土层之间形成一个不透水的“泥壳”,不仅可以有效减少减摩泥浆的流失,提高润滑效果,而且在一定程度上也能起到减少地下深层土体沉降的作用。

从实用性、可行性、经济性及有效性多个方面考虑,最终选择了工程当地的黄黏土作为本次黏土稠浆的拌制原料。

由于黏土稠浆密度大、黏稠度高,一般注浆泵无法压注,经过试验比选,选择了套筒式活塞泵作为本次的注泥设备。

### 3.2.2 选择黏土泥浆配合比

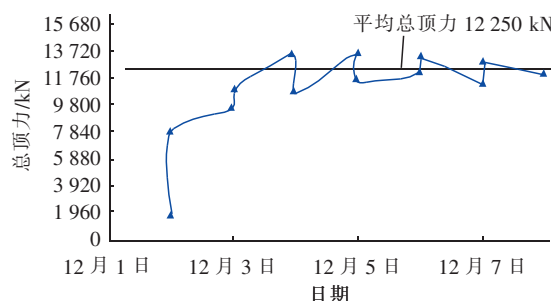
通过不同配合比的黏土稠浆试拌,发现单纯用当地黏土制成的泥浆黏度不高( $<40$  s),且由于颗粒较大,泥浆密度较大( $>1.51$  g/cm<sup>3</sup>),静置一段时间后沉淀明显,故作为减摩泥浆并不适宜。

技术人员随后对黏土稠浆的拌制方案进行调整,决定以黏土+膨润土作为制浆原料,采用正交试验设计法<sup>[7-9]</sup>确定黏土稠浆的拌和配合比。

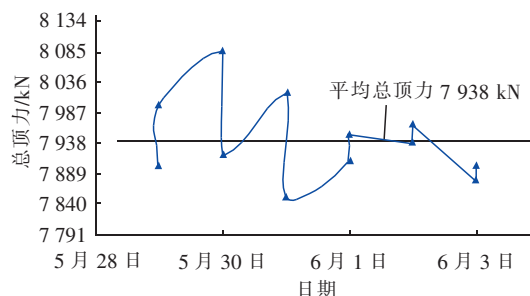
通过正交试验设计法,选择了试验结果黏度大、密度小的泥浆配合比方案A2B2C1(即黏土:膨润土:水=500:60:500),作为本次黏土稠浆的拌制配合比。

### 3.2.3 试顶进验证注泥效果

在确定了黏土稠浆的拌和配合比之后,开始进行试顶进,验证注泥效果。考虑沿途管损,注浆压力取 $P_{底}=0.3$  MPa、 $P_{侧}=0.28$  MPa、 $P_{顶}=0.25$  MPa,在正常顶速2~3 cm/min情况下,压注流量约控制在2.16 L/min。通过采取注泥的对策,对顶管外壁的减阻润滑效果明显,试顶进过程中总顶力也明显下降,注泥方案实施前、后的总顶力对比见图7。



a. 注泥方案实施前



b. 注泥方案实施后

图7 注泥方案实施前、后总顶力对比曲线

Fig. 7 Comparison curve of total jacking force before and after implementation of mud injection scheme

由图7可看出,原顶进阶段总顶力平均值为12 250 kN(1 250 t),通过采取注泥措施,改善了减摩泥浆流失问题,使管节外部的减摩泥浆套得以形成,减阻效果明显,使平均总顶力降至7 938 kN(810 t),降幅达35.2%,已超目标值30%,达到了对策目标。

## 3.3 采用膨润土泥浆,调整泥浆配合比

### 3.3.1 通过实验室试验,调整土体改良泥浆配合比

经过对策比选,最终仍选择膨润土泥浆作为本次土体改良的主要材料,但是需要对泥浆配合比进一步优化调整。



采用正交试验设计法<sup>[10]</sup>确定土体改良泥浆配合比(见表2)。

表2 土体改良泥浆调整后的配合比

Tab.2 Mix proportion of soil improved mud after adjustment

配合比	膨润土 掺量/kg	水/kg	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	型号
1	100	1 000	1.02	ZEB-C3
2	200	1 000	1.04	ZEB-C3

### 3.3.2 现场拌制泥浆,进行试顶进

调整改良泥浆配合比之后,现场组织试顶进,顶进过程中同步注入优化后的膨润土泥浆,考虑沿途管损,注浆压力取  $P_{\text{底}} = 0.32 \text{ MPa}$ 、 $P_{\text{侧}} = 0.3 \text{ MPa}$ 、 $P_{\text{顶}} = 0.28 \text{ MPa}$ ,在正常顶速  $2 \sim 3 \text{ cm/min}$  情况下,压注流量约控制在  $4.32 \text{ L/min}$ 。随机选取了试顶进过程中螺旋输送机排出的10仓渣土进行坍落度试验,试验结果如图8所示。

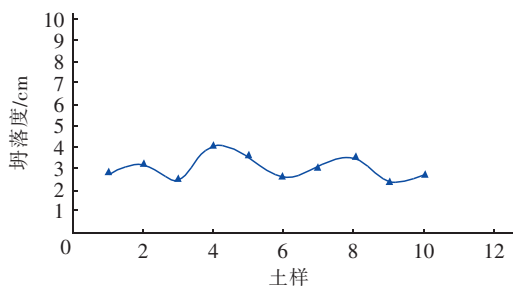


图8 改良土体坍落度曲线

Fig.8 Improved soil slump curve

从图8可以看出,10仓土样坍落度值均小于验证目标值8 cm,所以本条对策的实施达到了预期的目标。通过对土体改良泥浆配合比的优化与调整,试顶进过程中排出渣土的塑性明显改善。

## 4 对策实施效果评价

### 4.1 评价方法及目标值

经研究,决定在顶管后续顶进轴线上布设顶管上方土体沉降观测孔,通过对顶管上方土体沉降观测孔的测量来检视地下空洞情况。施工前,沿顶进轴线方向布设一系列沉降观测点,先在地表引孔(深约3 m),插入PVC管后在其中灌入细砂,同时在顶部埋入测钎,通过观测测钎的沉降量对地下土体的变化进行监控。

根据《顶管工程施工规程》(DG/TJ 08—2049—2008)及中国非开挖技术协会行业标准《顶管施工技术 & 验收规范(试行)》的相关要求,结合公司多个矩形顶管工程施工经验,将每个沉降孔测钎累计

沉降量限定值确定为  $\pm 20 \text{ mm}$  以内。

### 4.2 对策实施效果评价

通过各项对策措施的实施,引起超挖的关键因素基本消除,本工程矩形顶管施工任务顺利完成,后期顶进过程中未再发现地下空洞。对顶进过程中布设的17个顶管上方土体沉降点的累计沉降量统计如图9所示。

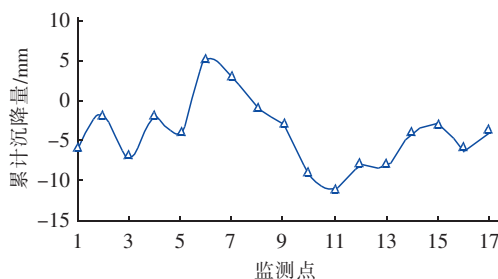


图9 顶管上方土体沉降点累计沉降曲线

Fig.9 Accumulated settlement curve of soil settlement observation points above pipe jacking

通过检查,各沉降点累计沉降量为  $-11 \sim 5 \text{ mm}$ ,均满足  $\pm 20 \text{ mm}$  以内的要求,本次处置工作目标圆满达成。

## 5 结论与建议

① 在复杂砂砾地层中,矩形顶管设备常用的隔膜式土压表易被砂土堵塞,进而导致土压力监测装置失效。应研究相适应的土压力监测系统,而本工程采用的全断面土压监测系统经过实践检验,可以较好地解决该类问题。

② 由于砂砾地层渗透系数相对较高,常规配比的减摩泥浆在地层中流失严重,导致管节外壁的减摩泥浆套始终无法形成,从而使顶管摩阻力很大。实际施工时,可采用浓泥代替传统的减摩泥浆并采用注泥设备向管节外部注入浓泥稠浆形成不透水“泥壳”,不仅可以有效减少减摩泥浆的流失,提高润滑效果,而且在一定程度上起到减少地下深层土体沉降的作用。减摩浓泥制备原材鼓励就地取材,其配合比设计建议采用正交试验设计方法确定。正式投入使用前,应当采集施工场地土样开展渗透性试验并进行试顶,以此检验所选浓泥配合比的适用性。

③ 矩形顶管施工过程中应当重视对顶管每日实际排土量、正面土压力监测值、总顶力值、刀盘扭矩实测值等施工参数的记录,出现空洞后应停工。首先对现场空洞实地调查,同时对施工参数进行统

计分析,利用原因关联分析法等找出产生空洞的主要原因,并针对性地制定和实施对策。

④ 不同土质条件对顶管机械选型具有重要影响,因此,如何提高土压平衡矩形顶管机对不同地质的适用性是后续研究的重要内容。

#### 参考文献:

- [1] 王长祥,冯树健,赫明水,等. 城市地下综合管廊供水管道设计[J]. 中国给水排水,2019,35(10):68-74.  
WANG Changxiang, FENG Shujian, HE Mingshui, et al. Design of water supply pipeline in urban underground utility tunnel[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(10):68-74(in Chinese).
- [2] 许有俊,王雅建,冯超,等. 矩形顶管施工引起的地面沉降变形研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(1):192-199.  
XU Youjun, WANG Yajian, FENG Chao, et al. Research on ground deformation caused by rectangular pipe jacking construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(1):192-199(in Chinese).
- [3] 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.  
DENG Changmao, PENG Jimin, SHEN Guohong. Discussion on control methods of ground surface settlement caused by rectangular pipe jacking construction in soft soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4):1002-1007(in Chinese).
- [4] 张雪婷. 矩形顶管施工顶进阻力计算与分析[D]. 武汉:武汉科技大学,2019.  
ZHANG Xueting. Calculation and Analysis of Jacking Resistance in Rectangular Pipe Jacking Construction [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [5] 范磊. 富水砂卵石地层矩形顶管机的研究及应用——结合成都川大下穿人民南路人行通道工程[J]. 隧道建设,2017,37(7):899-906.  
FAN Lei. Study and application of rectangular pipe jacking machine to pedestrian passageway on South Renminlu crossing underneath Sichuan University in Chengdu with water-rich sandy cobble strata[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(7):899-906(in Chinese).
- [6] 许有俊,冯超,王雅建,等. 矩形顶管机刀盘转动方向引起土舱压力变化规律的实测分析[J]. 铁道建筑,2016(7):55-59.  
XU Youjun, FENG Chao, WANG Yajian, et al. Analysis of measured earth pressure varying law induced by cutter-head rotation direction of rectangular pipe jacking machine[J]. Railway Engineering, 2016(7):55-59(in Chinese).
- [7] 郭小平,高天禹,汝绍锋,等. 基于正交试验设计方法优化仿生活塞结构参数[J]. 数理统计与管理,2018,37(4):624-630.  
GUO Xiaoping, GAO Tianyu, RU Shaofeng, et al. Optimization of bionic piston structure parameters based on the orthogonal experiment method [J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2018, 37(4):624-630(in Chinese).
- [8] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理,2010,27(9):52-55.  
LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9):52-55(in Chinese).
- [9] 贾丽洲,王伟山,郑柏存. 顶管施工用新型膨润土与聚合物润滑减阻浆液的性能研究[J]. 施工技术,2017,46(6):102-105.  
JIA Lizhou, WANG Weishan, ZHENG Baicun. Research on novel polymer and bentonite slurry's properties used in pipe jacking for lubricating and drag-reducing [J]. Construction Technology, 2017, 46(6):102-105(in Chinese).
- [10] 许有俊,文中坤,闫履顺,等. 多刀盘土压平衡矩形顶管隧道土体改良试验研究[J]. 岩土工程学报,2016(2):288-296.  
XU Youjun, WEN Zhongkun, YAN Lüshun, et al. Experimental study on soil improvement during construction of EPB rectangular pipe jacking with multi-cutter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016(2):288-296(in Chinese).

作者简介:刘琳(1976-),女,江西吉安人,硕士,副教授,现主要从事建筑结构、新型材料、土木工程施工技术等方面的教学与研究工作。

E-mail:565178272@qq.com

收稿日期:2020-02-05

修回日期:2020-03-07

(编辑:衣春敏)