

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.20.006

长距离曲线岩石顶管技术用于供水管道建设

黄智刚

(福州水务平潭引水开发有限公司, 福建 福州 350011)

摘要: 长距离供水管道受地形和选线的限制,必要时需穿越地质条件复杂的山体,增加了工程建设的难度和风险。近年来,曲线岩石顶管技术逐渐被用于供水管道的铺设,并获得了部分成功案例和工程经验,但在理论研究和施工工艺等方面仍有不足。结合某市长距离引水工程实例、围岩压力理论研究以及三维有限元数值模拟,按照管道埋深界限划分,提出并验证了适用于岩石地层顶管的围岩压力计算公式。基于现有规范和计算方法,给出了管浆理想接触条件下的岩石顶管摩阻力估算方法。分析了曲线顶进时顶管的轴向应力分布情况,总结出管节偏心度、截面核与顶管最大允许顶力之间的关系。

关键词: 供水管道; 岩石顶管; 曲线顶管

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)20-0039-06

Application of Long-distance Curved Pipe Jacking for Crossing Rock Formation in Water Supply Pipeline Construction

HUANG Zhi-gang

(Fuzhou Water Affairs Pingtan Water Diversion Development Co. Ltd., Fuzhou 350011, China)

Abstract: Limited by terrain and route selection, the long-distance water supply pipeline may cross a mountain with complicated geological conditions if necessary, which increases the difficulty and risk of project construction. In recent years, the curved pipe jacking for crossing rock formation has been gradually used for laying water supply pipes, and have some successful cases and engineering experience, however, it still has deficiencies in theoretical research and construction technology. Combining the example of a long distance water diversion project in a city, the theoretical study of surrounding rock pressure and the three-dimensional finite element numerical simulation, the calculation formula of surrounding rock pressure adaptable for rock pipe jacking is proposed and verified according to the pipeline depth limit division. Based on the existing specifications and calculation methods, a method for estimating the friction resistance of rock pipe jacking under ideal contact conditions of pipe slurry is provided. The axial stress distribution of the pipe during curved pipe jacking is analyzed, and the relationship among the eccentricity of the pipe joint, the core of the section and the maximum allowable jacking force of the pipe is summarized.

Key words: water supply pipeline; rock pipe jacking; curved pipe jacking

国内外已有调水工程以明渠为主要输水方式,而以深埋长隧洞为主要载体的调水工程较少^[1]。然而,受地形、地质条件和选线限制的影响,今后大量长距离供水管道将不可避免地穿越地质构造复杂

的岩石地层,面临着自然环境恶劣、工程建设难度大和运营风险高等诸多挑战。

顶管技术作为一种对周围环境影响较小的非开挖施工方法,应用范围、适用地层越来越广泛,并且

已实现曲线顶进,可应用于供输水管道穿越复杂岩层的建设中。经过不断的探索和经验积累,曲线岩石顶管技术的设计和施工工艺开始逐步完善,在安全性、经济性和施工进度等方面取得了一定的进展。目前,国内已有穿越岩石地层的顶管工程案例^[2-4],积累了一定的设计和施工经验。

相比于软土地层和直线顶管,运用长距离曲线岩石顶管技术铺设供水管道,在受力等方面存在如下特性:①岩石地层中顶管机迎面阻力为刀盘切削岩石的正面推力;不同埋深下,围岩压力状态不一致,管-岩接触压力、接触状态和相互作用也不同。②在岩石地层中,泥浆主要用于改善管-岩接触关系。③曲线顶管顶进力发生偏心时,管节接口传力面上的应力分布不均匀;偏心度过大会产生拉应力,导致接头部分张开甚至脱离^[5-7]。

针对上述问题,结合实际工程与数值模拟,重点研究岩石地层顶管的围岩压力、摩阻力计算方法,并分析曲线顶进时顶管的轴向应力分布情况。

1 工程案例

1.1 工程概况

某市长距离供水管道项目供水工程源引江水输送至净水厂,提水规模约为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。工程设计采用总长为 1 050 m 钢管进行顶管施工,分为 380 m 和 670 m 两段。沿线地下水含量丰富,主要为基岩裂隙水和孔隙潜水,需穿越风化程度不同的晶屑熔结凝灰岩,其饱和抗压强度最高可达 120 ~ 179 MPa。

选用可内部换刀的泥水平衡式硬岩顶管机进行顶管施工,额定顶力为 12 000 kN。以阶梯放坡分层开凿法施作 1 座工作井和 2 座接收井,以满足曲线轨迹要求。采用循环泥水进行注浆润滑,排出的泥水经过泥浆处理系统两级沉淀过筛后即可循环使用,总体上对泥浆的使用量较小。

1.2 施工关键技术

1.2.1 顶进力控制

在岩石地层中,顶管的迎面阻力为刀盘切削岩石的正面推力。当遇到硬度较大的岩石时,可增大顶推力和刀盘扭矩,降低顶进速度;遇到硬度较小的岩石或夹层软土时,顶推力、顶进速度和刀盘扭矩均有不同程度的下降。

1.2.2 中继间与纠偏

在 380 m 顶管段安装 2 个中继间,670 m 顶管

段安装 3 个中继间。同时,机头后方布置 1 个中继间,既加强机头破岩顶推力,又可用于顶进管道纠偏和机头止退。

岩石软硬不均匀时顶管机易发生姿态偏转和轴线偏离。通过刀盘的正转和反转来调整姿态异常,并保证掘进测量与纠偏的同步进行。顶管机配置止转撑靴,防止顶管机受刀盘破岩过程中的反扭矩作用而产生旋转。

1.2.3 刀具配置

在刀盘中心位置安装双刃滚刀,以克服切削半径小而易发生偏磨的情况;设置用于硬岩地层开挖收集岩渣的刮刀,布置在刀盘上时露出较短距离;刮刀正反方向布置,适应刀盘的正转和反转。

2 顶管围岩压力

顶管掘进机破岩顶进时,管壁四周和掌子面岩石出现应力重分布和变形,达到稳定平衡状态后,岩体与管道接触面上的应力即围岩压力。影响围岩压力的因素众多,其中埋深是计算围岩压力所考虑的主要因素。

2.1 管道埋深划分

① 规范法

《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)中地下工程埋深满足以下情况时,可认为属于浅埋情况:

$$\text{岩层为Ⅲ级围岩: } H \leq 2R (2R \leq 10 \text{ m}) \quad (1)$$

$$\text{岩层为Ⅳ级围岩: } H \leq (2 \sim 4)R (2R \leq 10 \text{ m}) \quad (2)$$

$$\text{岩层为Ⅴ级围岩: } H \leq (4 \sim 6)R (2R \leq 5 \text{ m}) \quad (3)$$

式中 H ——顶管管道的埋深, m

R ——顶管管道的外径,可认为是隧洞半径, m

② 根据隧洞破坏形态划分

顶管工程可以借鉴隧道洞室工程中关于埋深分界的取值^[8]。假设不考虑地下水的干扰,在满足下式要求时,可以认为该顶管工程属于浅埋顶管:

$$H \leq (2 \sim 6)R \quad (4)$$

③ 等效深度法

可将压力拱的高度视为荷载等效深度,为安全起见,深、浅埋分界深度要大于荷载等效深度,埋深划分的计算式为:

$$H_q = \frac{Q}{\gamma} \quad (5)$$

$$H_p = (2 \sim 2.5) H_q \quad (6)$$

式中 H_q ——荷载等效深度, m

Q ——管道上方垂直均布围岩压力, kN/m²

H_p ——地下工程深、浅埋分界深度, m

γ ——管道上方围岩的天然重度, kN/m³

在式(5)和(6)的基础上, 可将管道埋深状态分为极浅埋、浅埋和深埋状态3种情况, 且3种情况下围岩压力的计算采用不同的模式。

2.2 计算分析

将管道埋深划分为极浅埋、浅埋和深埋3种状态后, 按照相应的方法对围岩应力进行计算。

① 极浅埋情况

极浅埋条件下, 顶管围岩压力可以采用简化土柱理论进行计算:

$$q = \gamma H \quad (7)$$

式中 q ——管道上方垂直均布荷载, kN/m²

侧向均布围岩压力(e_i)计算方法为:

$$e_i = \gamma H \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (8)$$

式中 φ ——围岩的内摩擦角

② 浅埋情况

参考《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)中的浅埋隧道荷载计算方法, 对圆形顶管适当修改和简化, 得出圆形顶管垂直均布围岩压力计算方法:

$$q = \gamma H (1 - \frac{\lambda H \tan \theta}{D}) \quad (9)$$

$\lambda =$

$$\frac{\tan \beta - \tan \varphi}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi - \tan \theta) + \tan \varphi \tan \theta]} \quad (10)$$

$$\tan \beta = \tan \varphi + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi + 1) \tan \varphi}{\tan \varphi - \tan \theta}} \quad (11)$$

式中 λ ——侧压力系数

θ ——管道上部两侧岩体的内摩擦角

β ——管道两侧破裂面与水平面的夹角

D ——管道直径, m

侧向围岩压力计算公式为:

$$e_i = \gamma H_i \lambda \quad (12)$$

此外, 浅埋状态下的围岩压力计算还可运用太沙基理论。管道顶部垂直均布围岩压力:

$$q = \frac{b_1 \gamma - c}{\lambda \tan \varphi} (1 - \exp^{-\frac{\lambda H \tan \varphi}{b_1}}) \quad (13)$$

$$b_1 = \frac{D}{2} + D \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (14)$$

式中 b_1 ——管道上方滑移岩体的宽度, m

c ——围岩的黏聚力, kPa

管道侧向围岩压力可按朗肯主动压力进行计算, 管道顶部和底部的侧向围岩压力分别为:

$$e_1 = q \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (15)$$

$$e_2 = (q + \gamma D) \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (16)$$

③ 深埋情况

参考《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)和《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018), 深埋顶管管道顶部垂直均布围岩压力的计算式为:

$$q = 0.45 \times 2^{s-1} \gamma [1 + i(D-5)] \quad (17)$$

式中 s ——围岩级别

i ——管道直径 D 每增加或减少 1 m 时, 围岩压力的增加率或减少率, 当 $D < 5$ m 时, $i = 0.2$; 当 $D > 5$ m 时, $i = 0.1$

侧向围岩压力计算公式根据经验法得出:

$$e_i = \lambda' q \quad (18)$$

式中 λ' ——侧压力系数, IV级围岩取 0.15 ~ 0.3, V级取 0.3 ~ 0.5, VI级取 0.5 ~ 1.0

此外, 当顶管埋深较大、上部岩体能够形成压力拱时, 可采用普氏理论, 完整坚硬岩层中顶管管道顶部垂直围岩压力为:

$$q = \frac{\gamma \sigma}{\sigma \tan \varphi + c} [\frac{D}{2} + D \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})] \quad (19)$$

式中 σ ——管道上部围岩发生剪切破坏时的正应力, kPa

松散软弱岩层中顶管管道顶部垂直围岩压力:

$$q = \frac{\gamma \sigma D}{2(\sigma \tan \varphi + c)} \quad (20)$$

顶管管道侧向围岩压力可采用式(15)、(16)计算。

2.3 数值模拟

采用 MID AS/GTS 软件对顶管施工中管道的围岩压力情况进行计算, 设定顶管施工每一阶段开挖顶进之后的计算结果都会随着顶管施工向前传递。

2.3.1 计算模型

岩体重度为 22 kN/m³, 弹性模量为 25.78 GPa, 内摩擦角取 42.4°, 黏聚力为 10 kPa, 泊松比为

0.35。钢顶管外径为 5 250 mm,壁厚为 40 mm,弹性模量为 210 GPa,重度为 76.93 kN/m³,泊松比为 0.3,管顶埋深为 7.7 m。泥浆层厚度为 60 mm。截取长度为 30 m 的岩石地层顶管,对管道受到的围岩压力进行有限元模拟。

管道采用实体单元,划分为 16 220 个单元、7 215 个节点;泥浆采用板单元,划分为 2 400 个四面体单元、2 440 个节点;土体采用实体单元,划分为 48 143 个单元、30 836 个节点。管道和泥浆模型见图 1。

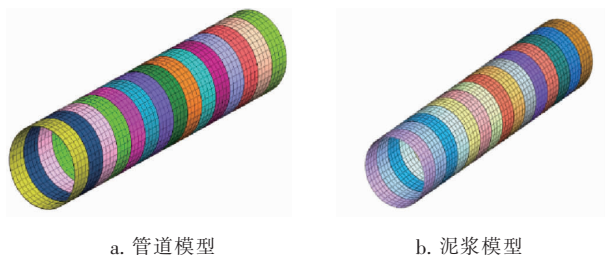


图1 管道模型和泥浆模型

Fig.1 Pipe model and mud model

设定顶管施工过程分为 16 个开挖步:第 1 个开挖步为施加初始地应力,使原始岩体内部地应力平衡;第 2~16 个开挖步分别开挖岩体、生成管道和泥浆。模拟顶进过程为岩体开挖,顶管机、管道和泥浆层不断向前移动直至顶进完成。开挖部分岩体后的模型如图 2 所示。

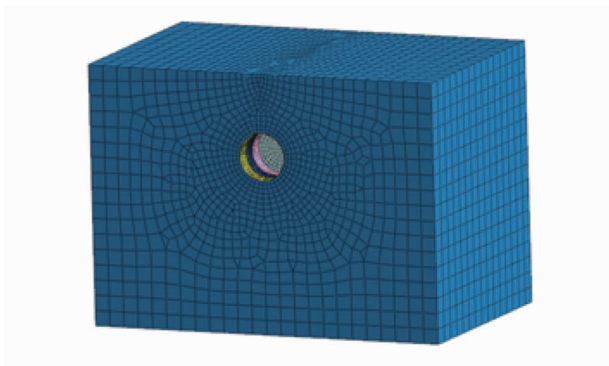


图2 开挖部分岩体后的模型

Fig.2 Model after partial rock mass excavation

2.3.2 有限元模拟结果

考虑到管顶压力的分布均匀性,可取 15 根管节中的前 8 根进行分析,第 9 根管节由于正处于掌子面开挖过程中没有显示,管道顶部、侧向围岩压力等值线云图如图 3 所示。结果显示,管道顶管压力分布大致呈横幅状,等值线的大小为 101.01 kPa,可认为管道顶部受到的围岩压力值在此值附近;管道侧

向中部位置的侧压力大致在 76.96 kPa,同样呈横幅状分布。

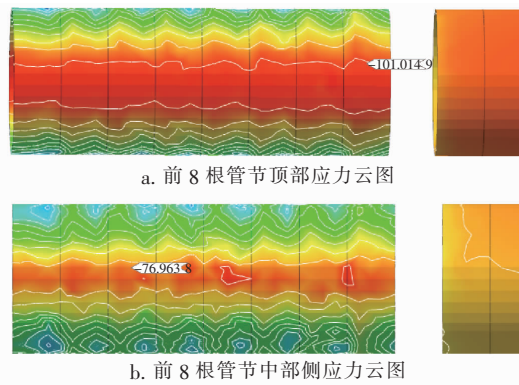


图3 管道顶部、侧向围岩压力等值线云图

Fig.3 Contour nephogram of surrounding rock pressure at the top and side of pipelines

2.3.3 理论与模拟结果对比

本节案例中的管道埋深为 7.7 m,穿越Ⅳ级围岩,根据式(2)、(4)可知,案例属于浅埋管道;根据等效深度法中的式(5)、(6)判断可知,管道埋深在荷载等效深度和分界深度之间。综上,本节案例属于浅埋管道。

按照式(9)计算围岩压力:由式(10)、(11)计算得侧压力系数 λ 为 0.325 7,代入式(9),可得顶管管道顶部的围岩压力为 96.52 kPa;由式(12)计算得管道中部侧压力为 74.01 kPa。

按照太沙基理论计算围岩压力:由式(14)计算得管道上方滑移岩体的宽度值 b_1 为 4.94 m,取侧压力系数为 0.15,将各参数代入式(13)可得管道顶部的围岩压力为 171.47 kPa,根据朗肯主动土压力计算方法得管道中部侧压力为 101.10 kPa。

围岩压力的数值分析结果、土柱理论解以及太沙基理论解对比见表 1。

表1 围岩压力计算结果对比

Tab.1 Comparison of calculation results of surrounding rock pressure

项 目	数值分析结果/ kPa	式(9) 结果/ kPa	相差 百分 比 1/%	太沙基 理论结 果/kPa	相差百 分比 2/ %
顶部围岩压力	101.01	96.52	4.53	171.47	69.76
侧向围岩压力	76.96	74.01	3.83	101.10	31.37

注: 相差百分比 1 = [数值分析结果 - 式(9)结果] / 数值分析结果 × 100%, 相差百分比 2 = (太沙基理论结果 - 数值分析结果) / 数值分析结果 × 100%。

对比结果显示,按照式(9)计算的围岩压力结

果略大于数值模拟结果,相差率在10%以内,数值模型的建立较为准确;按照太沙基理论计算的围岩压力结果明显大于数值模拟结果,此方法过于保守,由此估计顶进力可能会造成浪费。

3 管壁摩阻力计算

3.1 管岩理想接触状态

管道在自身重力和泥浆浮力的共同作用下呈现不同的管-岩接触关系^[9]。良好注浆效果下顶管悬浮于浆液中,不与岩石直接接触,不存在管壁与岩石之间的摩擦力。

3.2 摩阻力估算方法

岩层中顶管的管壁摩阻力计算,参考软土中的管壁摩阻力计算方法进行估算:

$$F_f = \mu_1 \pi D L \frac{(q_1 + q_2 + q_{1e} + q_{2e})}{4} \quad (21)$$

式中 F_f ——管道管壁摩阻力, kN

μ_1 ——管道外侧与泥浆的摩擦系数,良好注浆状态下取值范围在0.07~0.1^[10]

L ——管节长度, m

q_1 ——管道上部围岩压力, kPa

q_2 ——管道底部围岩压力, kPa

q_{1e} ——管道上部侧压力, kPa

q_{2e} ——管道底部侧压力, kPa

4 曲线顶管轴向应力分析

曲线顶管顶进力作用轴线与管道轴线不平行,顶进力在管节接头上作用点的偏心度会改变管节的应力状态,甚至造成管节损坏。管节接头处只出现压应力时的偏心度(R_n)称为截面核,计算公式为:

$$R_n = \frac{D_e [1 + (\frac{D_i}{D_e})^2]}{8} \quad (22)$$

式中 D_e ——管节外径, m

D_i ——管节内径, m

根据偏心度 r 的大小,顶管轴向应力状态可分为4种:

① 当 $r=0$ 时,管节接头处的最大应力和最小应力分别为:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \frac{F}{A} = \sigma_0 \quad (23)$$

式中 F ——管节接触传递的轴向力, kN

A ——管道横截面面积, m^2

② 当 $r=R_n$ 时,此时轴向力作用点位于截面

核边缘处,管节接头处的最小应力为0,最大应力为:

$$\sigma_{\max} = 2 \frac{F}{A} = 2\sigma_0 \quad (24)$$

③ 当 $0 < r < R_n$ 时,轴向力的作用点在截面核心内部区域,此时作用在管节接头横断面圆环上的应力仍均为压应力,管节接头处的最大应力和最小应力分别为:

$$\sigma_{\max/\min} = (1 \pm \frac{r}{R_n}) \sigma_0 \quad (25)$$

④ 当 $R_n < r < \frac{D_e}{2}$ 时,轴向力的作用点位于截面核之外,管节接头处的最大应力和最小应力分别为:

$$\sigma_{\max/\min} = (1 \pm \frac{r}{R_n}) \sigma_0 \quad (26)$$

综上,当曲线钢顶管管节接头处出现最小应力 $\sigma_{\min} < 0$ 的情况时,曲线外侧管节接头处出现拉应力,压应力的作用面积即为顶进力的有效作用面积。因此,曲线管道的允许顶进力将小于直线顶管,但总顶进力更大,必要时应布置多个中继间以处理局部位置需要更大顶力的情况。

5 结论

① 管道埋深可分为3种状态,分别对应不同的顶管围岩压力计算公式:极浅埋状态下,管道上部围岩压力可用土柱理论计算;浅埋状态下,以滑移岩块计算法或太沙基模型计算围岩压力;深埋状态下,借鉴规范或应用压力拱理论计算围岩压力。

② 理想状态下,岩石地层顶管的管周接触应为管浆接触状态,管壁摩阻力稳定保持在较低值范围,有利于管道顶进,可参考软土地层对摩阻力进行估算。

③ 曲线顶管在不同偏心度下的管节应力状态不同:偏心度在一定范围内,管节接头处只存在压应力;当顶管偏心度超过截面核时,管道一端会承受拉应力,此时管道另一端的最大压应力决定了顶管的最大允许顶力。

参考文献:

- [1] 钮新强,张传健. 复杂地质条件下跨流域调水超长深埋隧洞建设需研究的关键技术问题[J]. 隧道建设, 2019, 39(4): 523-536.
- Niu Xinqiang, Zhang Chuanjian. Some key technical

- issues on construction of ultra-long deep-buried water conveyance tunnel under complex geological conditions [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 523 – 536 (in Chinese).
- [2] 刘敏. 影响硬岩顶管机在复合地层中顶进速率的原因分析[J]. 建设科技, 2015(11): 126 – 127.
Liu Min. Analysis of factors affecting the jacking rate of hard rock pipe-jacking machine in composite formation [J]. Construction Science and Technology, 2015(11): 126 – 127 (in Chinese).
- [3] 王鹏. 长距离大口径硬岩顶管施工管理技术探讨[J]. 中国给水排水, 2016, 32(14): 119 – 122.
Wang Peng. Discussion on long distance and large diameter pipe-jacking construction management technology in hard rock area [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(14): 119 – 122 (in Chinese).
- [4] 蔡开玺, 叶文武, 陈爱华, 等. 强风化岩层中大直径顶管技术的应用实践[J]. 岩土工程界, 2009, 12(3): 49 – 52.
Cai Kaixi, Ye Wenwu, Chen Aihua, *et al.* Application of large diameter pipe jacking technology in strong weathered rock [J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(3): 49 – 52 (in Chinese).
- [5] 张鹏, 王翔宇, 曾聪, 等. 深埋曲线钢顶管受力特性现场监测试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1842 – 1848.
Zhang Peng, Wang Xiangyu, Zeng Cong, *et al.* Site monitoring of mechanical characteristics of pipes during steel curved pipe jacking under large buried depth [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1842 – 1848 (in Chinese).
- [6] 谢红明, 王翔宇, 王文州, 等. 曲线钢顶管管节受力特性试验[J]. 地质科技情报, 2016, 35(2): 79 – 82.
Xie Hongming, Wang Xiangyu, Wang Wenzhou, *et al.* Experimental study on pipe's mechanical characteristics of steel curved pipe jacking [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(2): 79 – 82 (in Chinese).
- [7] 张鹏, 马保松, 曾聪, 等. 曲线钢顶管同向弯曲管节应力特性试验研究[J]. 给水排水, 2017, 43(6): 116 – 121.
Zhang Peng, Ma Baosong, Zeng Cong, *et al.* Experimental study on stress characteristics of bent sections in the same direction in curved steel pipe jacking [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(6): 116 – 121 (in Chinese).
- [8] 郑颖人, 徐浩, 王成, 等. 隧洞破坏机理及深浅埋分界标准[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(10): 1851 – 1856.
Zheng Yingren, Xu Hao, Wang Cheng, *et al.* Failure mechanism of tunnel and dividing line standard between shallow and deep bury [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(10): 1851 – 1856 (in Chinese).
- [9] 张鹏, 谈力昕, 马保松. 考虑泥浆触变性和管土接触特性的顶管摩阻力公式[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2043 – 2049.
Zhang Peng, Tan Lixin, Ma Baosong. Formulae for frictional resistance considering mud thixotropy and pipe-soil contact characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2043 – 2049 (in Chinese).
- [10] Pellet-Beaucour A L, Kastner R. Experimental and analytical study of friction forces during microtunneling operations [J]. Tunn Undergr Space Technol, 2002, 17(1): 83 – 97.



作者简介:黄智刚(1977 –),男,福建周宁人,博士,高级工程师,总工程师,福建省水利学会理事,福建省水利学会平潭引水工程创新驱动服务站站长,主要从事水利工程设计研究工作。

E-mail:1330010036@qq.com

收稿日期:2020 – 06 – 22