

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.003

岩屑堆积下原水隧洞硬岩钢顶管顶进力计算

赵汝森¹, 陈志东¹, 冯鼎华¹, 刘祺平¹, 温佩文¹, 杨宏伟²

(1. 广东省水利水电第三工程局有限公司, 广东 东莞 523017; 2. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510275)

摘要: 近年来,顶管法在岩石地层中的应用日益广泛。在岩石顶管顶进过程中,超挖间隙中岩屑的堆积不可避免地影响管岩接触状态,进而影响硬岩顶管顶进力的大小。针对硬岩长距离钢顶管顶进力计算缺乏规范指导的问题,提出一种考虑岩屑堆积效应的顶进力计算模型。该模型耦合滚刀破岩迎面阻力与管-浆-渣多态接触摩阻力,并通过国内双向对顶硬岩顶管工程进行验证。结果表明:当岩屑堆积量较少时,管-岩呈顶部点接触,顶进力相比无岩屑工况略有减小;当沉渣带占比达60%~100%时,管-渣接触主导顶进力,摩阻力上升约20%。理论曲线与硬岩顶管工程的现场实测顶进力数据吻合较好,可为类似工程提供设计依据。

关键词: 钢顶管; 岩屑; 顶进力; 管岩接触; 超挖间隙

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0015-07

Calculation of Jacking Force for Hard Rock Steel Pipe Jacking in Raw Water Tunnel Considering Rock Debris Accumulation

ZHAO Rusen¹, CHEN Zhidong¹, FENG Dinghua¹, LIU Qiping¹, WEN Peiwen¹, YANG Hongwei²

(1. Guangdong Provincial Water Conservancy and Hydropower Third Engineering Bureau Co. Ltd., Dongguan 523017, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In recent years, the pipe jacking method has been increasingly applied in rock formations. During rock pipe jacking, the accumulation of rock debris in the over-excavation gap inevitably affects the pipe-rock contact condition, thereby influencing the jacking force in hard rock strata. To address the lack of standardized guidelines for calculating jacking forces in long-distance steel pipe jacking through hard rock, this study proposes a jacking force calculation model that accounts for the effects of rock debris accumulation. The model integrates face resistance based on the disc cutter rock-breaking mechanism with frictional resistance under multistate pipe-slurry-debris contact conditions, and is validated through domestic bidirectional hard rock pipe jacking project. The results indicate that when debris accumulation is minimal, pipe-rock top-point contact occurs, resulting in a slight decrease in jacking force compared to debris-free conditions. When the sedimentation zone ratio reaches 60%–100%, pipe-debris contact dominates, leading to an approximately 20% increase in frictional resistance. The theoretical curves are in good agreement with field-measured jacking forces in hard rock pipe jacking,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52578495); 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2021ZT09G087)
通信作者: 杨宏伟 E-mail: yanghw9@mail.sysu.edu.cn

providing a critical design reference for similar projects.

Keywords: steel pipe jacking; rock debris; jacking force; pipe-rock contact; over-excavation gap

顶管法应用于岩石地层时,超挖间隙中岩屑的堆积会导致管-岩接触状态发生动态变化,显著影响顶进力。现有研究多聚焦于土层顶管或简化岩屑效应^[1-3],尚缺乏针对硬岩顶管考虑岩屑堆积的顶进力计算规范。目前,传统土层顶管顶进力计算方法已较为成熟^[1-3],而对于岩石地层顶进力的计算研究仍处于起步阶段,且主要集中在管壁摩阻力分析。既有顶管管壁摩阻力计算公式多基于Haslem^[4]提出的开挖面稳定假设和O'reilly等^[5]提出的管土全接触假设。然而,实际施工中常通过向管节四周注入润滑泥浆的方式来减小管壁摩阻力,忽略注浆效应的单一管土接触模型计算结果与实测存在偏差^[6-7]。张鹏等^[8]在考虑注浆效应的前提下提出“管岩+管浆”接触模型,采用Persson模型分析管岩接触宽度和接触压力的分布规律,推导出直线岩石顶管的管壁摩阻力公式,减小了使用经验取值带来的误差,但未考虑泥浆的悬浮作用。赵文彬^[9]提出考虑掘进后隧洞的稳定性,分别从管岩接触和管浆接触计算管侧摩阻力,并采用Hertz与Persson两种弹性接触理论推导出一种顶进力计算模型。总体而言,现有岩石顶管迎面阻力计算多借鉴全断面隧道掘进机(TBM)刀盘滚刀破岩时的切削阻力计算方法;计算管壁摩阻力时部分学者参考土层顶管摩阻力计算方法,少数研究在此基础上进一步考虑了岩屑影响。然而,岩石顶管在注浆作用下存在复杂的管-浆-岩-岩屑接触状态,部分接触模型假设过于理想,难以真实反映实际工况。

针对目前缺乏设计规范指导的硬岩长距离顶管顶进力计算问题,分析了滚刀破岩机理及迎面阻力模型,从是否注浆、注浆条件下是否存在岩屑两个角度对管-浆-岩-岩屑接触模型进行研究,并提出相应的顶进力计算公式。依托国内一项超长距离双向对顶硬岩顶管工程,分析顶进力变化规律,验证模型的适用性,可供类似项目参考。

1 工程实例

1.1 工程概况

本研究以中山市南部三镇取水口上移顶管工

程(穿越铁炉山段)为例进行分析。该取水口上移工程总里程约33 km,其中往坦洲方向供水需穿越铁炉山,选用岩石顶管技术铺设此段供水管道。工程顶进总长度2 653 m,采用东西两侧对顶方式施工,西侧神湾段顶进1 261 m,东侧坦洲段顶进1 392 m,均选用DN1 800×22 mm钢管,最终于山体中部完成对接。

基于岩石地层的自稳性(围岩具有自稳能力,渗透系数 $>1\times10^{-7}$ m/s)以及顶进需求(需二次破碎和便捷更换刀具),岩石顶管工程多选用配备破岩装置的泥水平衡掘进机进行施工。本工程重点研究的坦洲段选用HRC 1500岩石掘进机,机身外径为1.82 m,刀盘切削外径为1.88 m,由6个液压千斤顶提供顶进力。

掘进机机头正面如图1所示。



图1 岩石掘进机机头正面

Fig.1 Front view of the head of a rock drilling machine

1.2 地质条件

铁炉山主峰海拔474 m,是坦洲镇最高峰,顶管穿越时最低覆岩厚度仅3 m,最高覆岩厚度达286 m。东侧坦洲段顶管穿越地层主要为砂岩和凝灰岩,其中凝灰岩地层有裂隙带发育,并伴随大量裂隙水。顶管穿越地层整体情况如图2所示。可知,铁炉山西端进口段起点位于神湾镇柚埔村,东端终点出口段位于坦洲镇沾涌村。顶管轴线主要穿越岩层<4-3-2>中风化砂岩、岩层<4-4>微风化砂岩。

重点研究的坦洲段地质情况如图3所示。

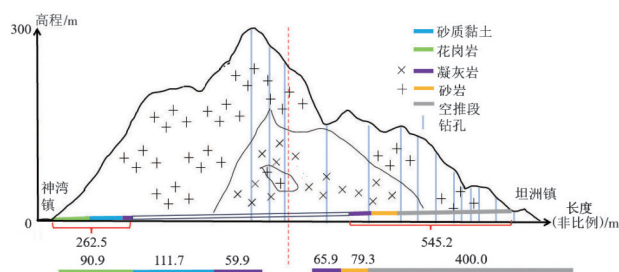


图2 顶管穿越地层分布示意

Fig.2 Distribution schematic of pipe jacking through stratum

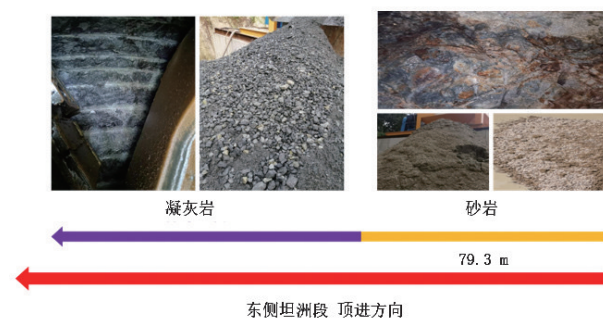


图3 坦洲段地质情况

Fig.3 Geology of Tanzhou section

1.3 顶进力实测分析

在岩石顶管工程施工期间,重点对东侧坦洲段工程的顶管顶进力数据进行了记录。图4为实测顶进力随累计顶进距离的变化曲线。

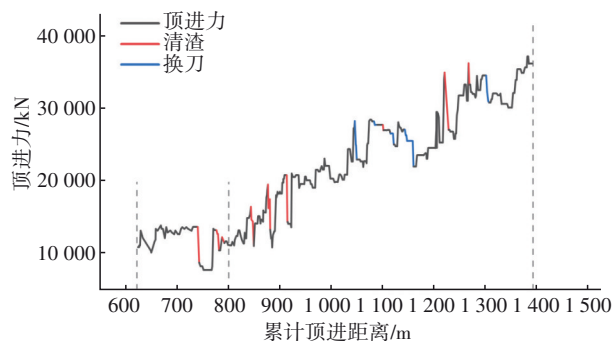


图4 顶进力随累计顶进距离变化曲线

Fig.4 Variation curve of jacking force with cumulative jacking distance

由图4可知,在623~800 m区间,总顶力基本维持在13 500 kN左右;此后,随着顶进距离的增加,顶管总顶力逐渐增大,且波动幅度加剧。岩石顶管所需的顶进力主要由迎面阻力和管壁摩阻力组成,当开挖面围岩稳定时,刀盘迎面阻力基本不变,此时总顶力的变化趋势可反映管壁摩阻力的变化,即管

壁摩阻力随顶进距离的增加大体呈线性增长趋势。此外,顶进过程中多次出现顶进力骤降现象。结合施工日志分析发现,这些下降时刻与管壁冲渣或更换刀具操作的时间点一致,重新顶进后总顶力明显降低。

2 硬岩长距离钢顶管顶进力模型

岩石顶管顶进力组成示意图5。迎面阻力主要考虑盘型滚刀破岩的作用机制,其破岩过程涉及刀岩相互作用中岩石的挤压、剪切和拉伸等复杂力学行为。关于管壁摩阻力的计算方法基于以下假设:①管节处于深埋状态,且顶进后围岩保持稳定;②不考虑由轴线偏差等导致的管节侧面与围岩接触,仅考虑由泥浆和岩屑引起的管节顶部/底部与围岩接触;③不考虑顶进后围岩的收敛变形,同时忽略管节自身变形;④将管节下部岩屑与泥浆的混合物看作均质沉渣带,且沉渣带各位置与管节之间存在唯一的管渣摩擦系数。

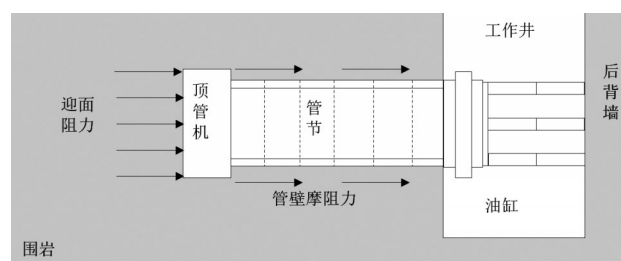


图5 岩石顶管顶进力组成示意

Fig.5 Schematic of rock pipe jacking force composition

2.1 硬岩顶管迎面阻力

岩石顶管迎面阻力 F_a 的计算参考徐天硕等^[2]提出的模型,其计算公式为:

$$F_a = m(F_1 + F_2) \quad (1)$$

式中: F_1 为垂直力,kN; F_2 为刀盘切削侧向力,kN; m 为滚刀数量,把。

F_1 参考Evans等^[10]提出的盘型滚刀破岩受力模型进行计算,其表达式为:

$$F_1 = \sigma_c A_c \quad (2)$$

式中: σ_c 为岩石单轴抗压强度,MPa; A_c 为滚刀刀刃与岩石接触面投影面积, m^2 。

滚刀贯入岩石如图6所示。将滚刀与岩石接触面的投影近似为梯形(见图7),投影面积的计算见下式:

$$A_c = [2h \tan(\theta/2) + l] r_0 \sin \varphi \quad (3)$$

$$\varphi = \arccos(1 - h/r_0) \quad (4)$$

式中: h 为滚刀贯入深度,m; θ 为滚刀刀尖角, $^\circ$; l 为滚刀刀宽,m; r_0 为滚刀半径,m; φ 为滚刀入岩圆心角,rad。

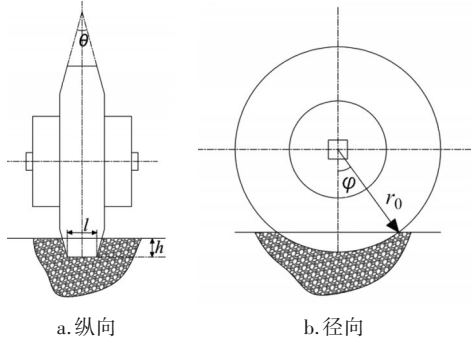


图6 滚刀贯入岩石示意

Fig.6 Schematic of hob penetrating rock

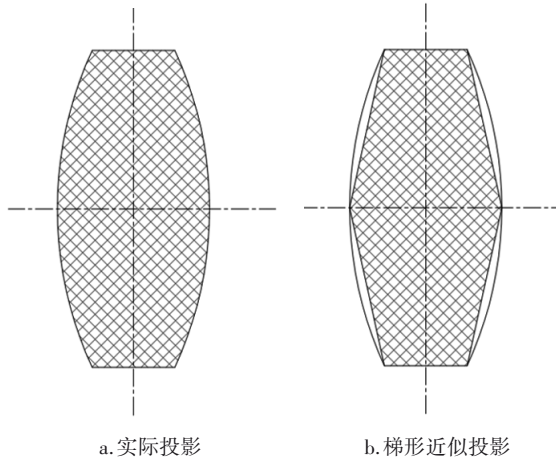


图7 滚刀与岩石接触面投影示意

Fig.7 Projection schematics of contact surface between hob and rock

滚刀侧向力示意图8。

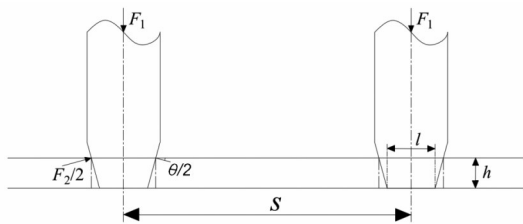


图8 滚刀侧向力示意

Fig.8 Schematic of hob lateral force

其计算参考剪切破碎理论^[11],具体见下式:

$$F_2 = \tau_f A_f \sin(\theta/2) \quad (5)$$

$$A_f = 2r_0 \sin \varphi [S - 2h \tan(\theta/2) - l] \quad (6)$$

式中: τ_f 为岩石抗剪强度,MPa; A_f 为相邻滚刀刀剪切破碎区域在岩石表面的投影面积, m^2 ; S 为

相邻滚刀的刀间距,m。

2.2 硬岩顶管管壁摩阻力

管岩摩阻力的计算考虑管岩接触和管渣接触两种不同形式。管岩接触摩阻力计算中,当超挖间隙不存在岩屑时,管岩处于点接触状态^[12]。若管节四周未注入泥浆且无岩屑堆积,管岩接触状态如图9(a)所示。此时管壁摩阻力等于管岩摩阻力,则单位长度管壁摩阻力的计算公式为:

$$f_c = f_r = G\mu_r \quad (7)$$

式中: f_c 为单位长度管壁摩阻力,kN/m; f_r 为单位长度管岩摩阻力,kN/m; G 为单位长度管节自重,kN/m; μ_r 为管岩摩擦系数。

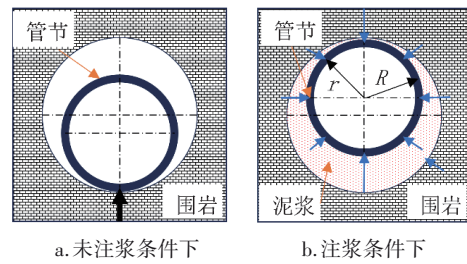


图9 管岩点接触状态示意

Fig.9 Schematic of pipe-rock point contact

当管节四周注入泥浆且不存在岩屑时,管岩接触状态如图9(b)所示。单位长度管壁摩阻力由单位长度管浆摩阻力和单位长度管岩摩阻力两部分组成,具体见下式:

$$f_c = \left| \pi(R^2 - r^2)\rho_p g - \pi R^2 \rho_w g \right| \mu_r + 2\pi R P_m \mu_m \quad (8)$$

式中: R 为管节外半径,m; P_m 为管节外侧泥浆压力,MPa; μ_m 为管浆摩擦系数; r 为管节内半径,m; ρ_p 为管节密度, g/cm^3 ; ρ_w 为润滑泥浆密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度,取 $9.81 m/s^2$ 。

管渣接触模型参考邓志云等^[12]的计算模型,具体见图10。

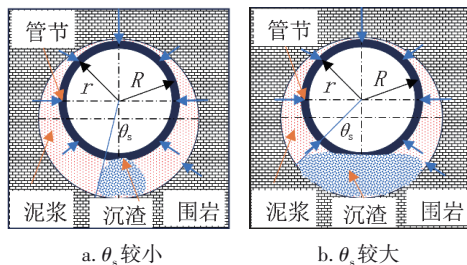


图10 管渣接触状态示意

Fig.10 Schematic of pipe-slag contact

假设管底沉渣角为 $2\theta_s$,当管节四周注入泥浆且存在岩屑时, f_c 由单位长度管渣摩阻力 f_s 和单位长度管浆摩阻力 f_m 两部分组成,其计算为:

$$f_c = f_s + f_m \quad (9)$$

$$f_s = \left[\pi(R^2 - r^2)\rho_p g - \pi R^2 \rho_w g \right] \mu_s \quad (10)$$

$$f_m = 2(\pi - \theta_s)RP_m \mu_m \quad (11)$$

式中: μ_s 为管渣摩擦系数。

假设沉渣带中的少量泥浆无法有效传递浮力,则单位长度管节所受浮力 F_w 可表示为:

$$F_w = \rho_w R^2 (\pi - \theta_s - 2 \sin \theta - 1/2 \sin 2\theta_s) \quad (12)$$

$$f_c = \begin{cases} \left[\rho_w g R^2 (\pi - \theta_s - 2 \sin \theta_s - 1/2 \sin 2\theta_s) - \pi(R^2 - r^2)\rho_p g \right] \mu_r + 2(\pi - \theta_s)RP_m \mu_m & \theta_s \leq 32^\circ \\ k_s \left[\pi(R^2 - r^2)\rho_p g - \rho_w g R^2 (\pi - \theta_s - 2 \sin \theta_s - 1/2 \sin 2\theta_s) \right] \mu_s + 2(\pi - \theta_s)RP_m \mu_m & \theta_s > 32^\circ \end{cases} \quad (13)$$

式(13)表明,少量岩屑的存在会使管节所受浮力较无岩屑时减小,从而导致管岩接触压力降低。当岩屑堆积较多时,管节所受浮力小于其自身重力,管岩接触状态随之转变为管渣接触。此时,管壁摩阻力由管浆摩阻力和管渣摩阻力两部分组成,且管渣接触压力及管渣摩阻力随岩屑堆积程度的增加而增大。

3 硬岩顶管顶进力模型验证

总顶力的计算为:

$$F = F_a + f_c L \quad (14)$$

式中: F 为总顶力,kN; L 为管道总长度,m。

由于实际工程中管壁接触状态未知,因此在顶进力计算时分别考虑管岩接触和管渣接触两种形式。当管节四周注满润滑泥浆且不存在岩屑时,管岩发生顶部点接触。

根据前期地质报告,可按凝灰岩地层进行计算,其中整段岩石单轴抗压强度平均为98 MPa,抗剪强度取抗压强度的1/12;此外,在顶管施工过程中假设泥浆压力保持一致,取0.4 MPa;本次试验选用11英寸(1英寸=2.54 cm)盘型滚刀,直径280 mm,刀尖角约60°,滚刀贯入深度约15 mm,刀刃宽2 mm;刀盘布置中心刀1把、正面滚刀4把、边刀4把、扩孔刀2把;管岩摩擦系数取0.55,泥浆套完整时管浆摩擦系数取0.31^[13-14]。

联立式(1)、(2)、(5)、(8)和(14),并代入上述凝灰岩强度等参数,可得无岩屑条件下的顶进力计算公式:

$$F = 19.73L + 1577.66 \quad (15)$$

式(12)表明,当 $\theta_s = 32^\circ$ 时,单位长度管节所受浮力等于其自重。当岩屑堆积较少,即 $\theta_s \leq 32^\circ$ 时,管节上浮与围岩形成顶部点接触,不存在管渣接触压力,具体如图10(a)所示(若岩屑极少,管节上浮后沉渣与管节底部不接触,此接触状态可看作管节被润滑泥浆全包裹);当 $\theta_s > 32^\circ$ 时,管节下沉与管底沉渣带接触,具体如图10(b)所示。

综上所述,联立式(7)~(12),引入管渣接触压力系数 k_s ,当管节四周注入泥浆且管底存在岩屑时,单位长度管壁摩阻力 f_c 的计算公式为:

当发生管渣接触时,即随着顶进距离增加,机头破岩产生的部分岩屑进入超挖间隙,与泥浆混合后在管节底部形成沉渣带,管渣接触概率增大。此时顶管顶进力计算公式为:

$$F = F_a + f_{c_1} x + f_{c_2} (L - x) \quad (16)$$

式中: x 为管渣接触状态下的管道长度或沉渣带长度,m,可通过与工程监测数据的对比分析获得; f_{c_1} 、 f_{c_2} 分别为管渣接触状态及管岩接触状态下的单位长度管壁摩阻力,kN/m。

其中, F_a 由式(1)、(2)、(5)计算, f_{c_1} 由式(13)计算, f_{c_2} 由式(7)计算。参考相关工程及钢管与围岩性质,管渣摩擦系数 μ_s 取0.74,管渣接触压力系数 k_s 为1.2~1.6,管底沉渣角 $2\theta_s$ 和沉渣带长度 x 较难确定,结合工程实际开孔观察情况,发现沉渣带大体分布在下侧两注浆孔之间,其长度占顶进总长度的50%~100%。

将各参数代入上述公式,对四周注入润滑泥浆且存在岩屑时,单位长度管壁摩阻力 f_{c_1} 与 θ_s 的函数曲线进行分析:当 $\theta_s = 32^\circ$ 时,可得管渣接触条件下单位长度管壁摩阻力 f_{c_1} 下限值;当 $\theta_s = 73^\circ$ 时,可得管渣接触条件下 f_{c_1} 上限值。

综上,当管节四周注入泥浆且管底存在岩屑时,总顶力的计算为:

$$F = \begin{cases} 19.73L - 5.86x + 1577.66 & \theta_s = 32^\circ \\ 19.73L + 4.18x + 1577.66 & \theta_s = 73^\circ \end{cases} \quad (17)$$

为验证顶进力理论计算的准确性,将不同沉渣带长度下的顶进力理论值与实测值进行对比,具体见图11。

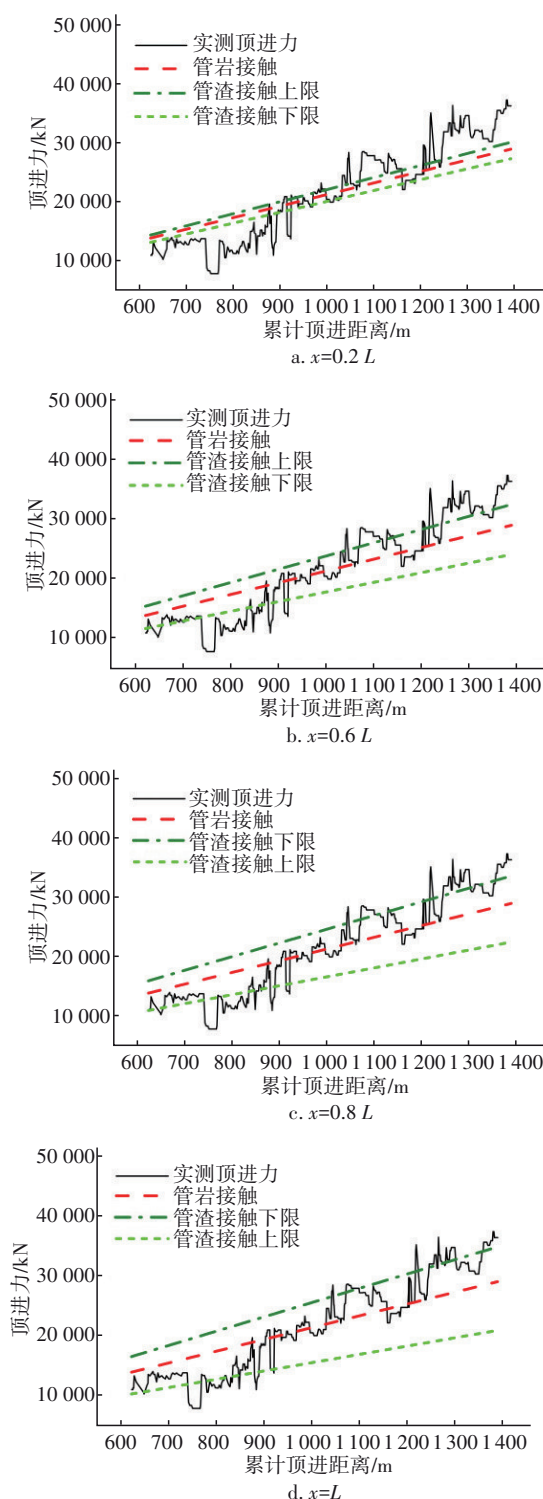


图11 顶进力对比曲线

Fig.11 Comparison curves of jacking force

若采用管岩顶部点接触公式进行顶进力计算,则得到的理论值与实测结果变化趋势基本一致,误差为14%左右。值得注意的是,随着累计顶进距离的增加,管岩点接触公式的理论值与实测值偏差逐

渐增大,而由管渣接触顶进力计算公式得到的理论值与实测值逐渐吻合。当沉渣带总长 x 占管道总长度 L 的60%~100%时,除去顶进力异常值,实测顶进力曲线基本处于管渣接触条件下顶进力理论下限方程与理论上限方程之间,说明无岩屑区域的管道长度约占顶进总距离的0%~40%,与现场开孔观察结果一致;管渣接触状态下,对比式(15)与(17),顶进力上限较无岩屑状态增加约20%。

综上,在硬岩长距离钢顶管工程中,顶进初期以管岩顶部点接触为主,随着顶进距离增加,接触状态逐渐转变为管渣接触。

4 结论

① 在硬岩长距离钢顶管顶进过程中,注浆条件下超挖间隙中的岩屑含量会显著影响管岩接触状态。当岩屑较少时,管节所受浮力相较于无岩屑时有所减小,但仍大于自身重力,管岩保持顶部点接触状态,管壁摩阻力由管浆摩阻力和管岩摩阻力两部分组成。少量岩屑的存在降低了管节所受浮力,使管岩接触压力减小,进而导致管岩摩阻力降低。当岩屑堆积较多时,管节所受浮力小于自身重力,管岩接触状态转变为管渣接触,管壁摩阻力由管浆摩阻力和管渣摩阻力两部分组成,且管渣接触压力和管渣摩阻力随岩屑堆积程度增加而增大。

② 硬岩长距离钢顶管顶进过程中,受地层变化、岩屑堆积、泥浆润滑及刀具布置等因素共同作用,管节与围岩的接触状态呈动态变化。顶进力理论计算结果与实测数据对比表明,顶进初期,管岩接触状态以顶部点接触为主;随着顶进距离增加,逐渐转变为管渣接触,沉渣带长度约占管道总长的60%~100%。本研究提出的硬岩长距离钢顶管顶进力计算公式具有较好的准确性与适用性,可为类似岩石顶管项目在前期机器选型和掘进参数选取等方面提供参考。

参考文献:

- [1] 毛红梅, 陈馈, 冯欢欢. 不同刀具配置下隧道掘进机高效破岩机理与推力预估[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9):1627-1633.
- MAO H M, CHEN K, FENG H H. Rock-breaking mechanism of TBM with different types of cutter tools and estimation of thrust force [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9):1627-1633(in

- Chinese).
- [2] 徐天硕,王乐,刘锴鑫,等. 基于滚刀破岩特性的岩石顶管迎面阻力计算模型[J]. 地质科技通报, 2022, 41(4):259-265.
- XU T S, WANG L, LIU K X, et al. A calculation model for the head-on resistance of rock pipe jacking based on the rock breaking characteristics of the disc cutter [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(4):259-265(in Chinese).
- [3] OSUMI T. Calculating jacking forces for pipe jacking methods [J]. No-Dig International Research, 2000, 586:2000.
- [4] HASLEM R F. Pipe-jacking forces: from practice to theory [C]// PROCTOR D C, WHYTE I L. Proceedings of ICE North Western Association Centenary Conference in Infrastructure Renovation and Waste Control. Manchester: ICE, 1986:173-180.
- [5] O'REILLY M P, ROGERS C D F. Pipe jacking forces [C]// FORDE M C. Proceedings of International Conference on Foundations and Tunnels. Edinburgh: Engineering Technics Press, 1987:201-208.
- [6] SHIMADA H, KHAZAEI S, MATSUI K. Small diameter tunnel excavation method using slurry pipe-jacking [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2004, 22(2):161-186.
- [7] 王双,夏才初,葛金科. 考虑泥浆套不同形态的顶管管壁摩阻力计算公式[J]. 岩土力学, 2014, 35(1):159-166,174.
- WANG S, XIA C C, GE J K. Formulae of lateral friction resistance for pipe-jacking considering different forms of mud screen [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1):159-166,174(in Chinese).
- [8] 张鹏,马保松,曾聪,等. 基于管土接触特性的顶进力计算模型分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2):244-249.
- ZHANG P, MA B S, ZENG C, et al. Numerical model for jacking force based on pipe-soil contact characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2):244-249(in Chinese).
- [9] 赵文彬. 岩石地层中钢顶管顶力计算方法与管道受力特性研究[D]. 长沙:中南大学,2022.
- ZHAO W B. Research on the Calculation Method of Steel Pipe Jacking Force and Pipe Mechanical Characteristics in Rock Formation [D]. Changsha: Central South University, 2022(in Chinese).
- [10] EVANS I, POMETRY C D. The Strength Fracture and Workability of Coal [M]. London: Pergamon Press, 1976.
- [11] 秋三藤三郎. ディスクカッター岩石破壊理論[J]. 小松技術ミヤナル, 1970, 16(3):56-61.
- [12] 邓志云,刘新荣,钟祖良,等. 长距离岩石顶管工程管节摩阻力研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(3):750-759.
- DENG Z Y, LIU X R, ZHONG Z L, et al. Study on pipe friction resistance of long-distance rock pipe jacking engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(3):750-759(in Chinese).
- [13] STEIN D, MÖLLERS K, BIELECKI R, et al. Microtunnelling: Installation and Renewal of Nonman-size Supply and Sewage Lines by the Trenchless Construction Method [M]. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1989.
- [14] SHOU K, YEN J, LIU M. On the frictional property of lubricants and its impact on jacking force and soil-pipe interaction of pipe-jacking [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(4):469-477.

作者简介:赵汝森(1978—),男,广东汕头人,本科,高级工程师,主要研究方向为市政路桥。

E-mail:331815791@qq.com

收稿日期:2025-08-01

修回日期:2025-08-12

(编辑:沈靖怡)