

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.20.010

长距离注浆顶管顶力规范公式的取值研究及分析

沈青松, 陈 烨, 叶盛华, 王潇弘, 姚 杰
(中国电建华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘 要: 随着顶管器械的升级和施工技术的完善,长距离注浆顶管管壁摩阻力有了大幅降低,现有的经验公式已无法准确计算顶力大小。收集大量已有顶管工程的实测顶力数据,将顶力增长分为3个阶段,并以此对平均摩阻力取值范围进行优化分析。通过优化后的取值范围计算得到的顶力上下限区间,可以覆盖90%的实测数据,与实测数据的相对误差平均值为30%左右,具有一定的准确度,可作为今后顶管顶力计算的参考依据。

关键词: 顶管; 顶力; 平均摩阻力; 经验公式; 取值范围

中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)20-0063-05

Research and Analysis on the Standard Formula Value for the Jacking Force of Long-distance Grouting Pipes

SHEN Qing-song, CHEN Ye, YE Sheng-hua, WANG Xiao-hong, YAO Jie
(PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310000, China)

Abstract: With the upgrading of pipe jacking equipment and the improvement of construction technology, the friction of long-distance grouting pipe jacking has been greatly reduced. The existing empirical formula can no longer accurately calculate the jacking force. This study collects a large amount of jacking force data from pipe jacking projects, and divides the jacking force growth into three stages to optimize the average friction value range. The upper and lower limits of the jacking force calculated through the optimized value range can cover 90% of the data, with average relative error of about 30%, which has a certain degree of accuracy and can serve as a reference for future pipe jacking force calculations.

Key words: pipe jacking; jacking force; average friction; empirical formula; value range

大力发展和应用地下空间可以顺应空间结构变化趋势,优化基础设施布局。其中地下管线作为城市基础设施的重要组成部分,其设施规划和建设数量呈逐年上升趋势。顶管法具有免开挖、扰动小、速度快等特点,在给排水、电力电缆和通信等领域应用广泛,已成为城市地下管线建设的主要方法之一。

在顶管工程中,顶力是管节结构设计、顶推设备选型以及工作井结构设计的重要依据,直接关系到工程的结构安全及造价。顶管顶力由迎面阻力和管壁摩阻力两部分组成,其中管壁摩阻力对顶力大小

起控制性作用。设计人员通常在给定的平均摩阻力范围内选取合适的数值,通过经验公式来计算顶力大小。然而,随着顶管施工器械的升级与施工技术的完善,管壁摩阻力已有大幅降低,现有的取值范围已经无法准确地描述现阶段平均摩阻力大小。为了提高经验公式的准确度,对平均摩阻力的取值范围进行研究及分析显得尤为重要。

通过收集大量已有顶管工程的实测顶力数据,总结归纳顶力和平均摩阻力的变化规律,对平均摩阻力取值范围进行优化分析,为今后的设计提供

参考。

1 经验公式

目前,顶管顶力计算的公式主要有以下几种:

① 上海结合当地地质条件,给出了采用泥浆减阻条件下的经验公式^[1]:

$$P = (8 \sim 12) \pi D L \quad (1)$$

式中: P 为顶管计算顶力,kN; D 为管道外径,m; L 为顶进距离,m。

② 针对顶管管道材质的不同,有以下相应的经验公式^[2]:

$$P = n \omega L \quad (2)$$

$$P = m \omega L \quad (3)$$

式中: n 为钢筋混凝土管道经验系数,在黏性土中可取1.5~2.0,在砂性土中可取3.0~4.0; m 为金属管道经验系数,在黏性土中可取0.8~1.0,在砂性土中可取1.5~2.0; ω 为每米管道重力,kN/m。

③ 《给排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)、《给排水工程顶管技术规程》(CECS 246:2008)和《顶管工程设计标准》(DG/TJ 08—2268—2019)给出了相同的顶力计算公式:

$$P = \pi D L f_k + N_F \quad (4)$$

式中: f_k 为管道外壁与土体的单位面积平均摩阻力,具体大小可参考表1; N_F 为管道迎面阻力。

表1 注浆管道外壁单位面积平均摩阻力

Tab.1 Average friction per unit area of outer wall of the grouting pipe $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$

项目	黏性土	粉土	粉、细砂土	中、粗砂土
钢筋混凝土管	3.0~5.0	5.0~8.0	8.0~11.0	11.0~16.0
钢管	3.0~4.0	4.0~7.0	7.0~10.0	10.0~13.0

2 工程案例与经验公式对比

前述经验公式整体形式简单,计算方便,但计算结果通常受到经验系数的影响,因此选取准确可靠的经验系数尤为重要。通过以下两个长距离顶管工程案例的实测数据来对比分析以上经验公式的准确性。

2.1 工程案例

案例1:厦门市翔安某海底地下综合管廊工程^[3]顶进距离达982 m,管道采用钢筋混凝土预制管节,外径为3.6 m,上覆土层厚度为6.5~18.0 m。管线范围内的土层主要为黏土层,土层重度为18.5 kN/

m^3 ,黏聚力为26 kPa,内摩擦角为 17° 。在施工过程中,注入触变泥浆来减小管道与土体之间的摩阻力。

顶力实测数据如图1(a)所示。

案例2:海口市美兰机场二期扩建场外排水工程^[4]顶进距离约700 m,管道采用钢筋混凝土预制管节,管节外径为3.6 m,上覆土层厚度约8 m。管线范围内的土层主要为粉砂层。在施工过程中,注入触变泥浆来减小管道与土体之间的摩阻力。

顶力实测数据如图1(b)所示。

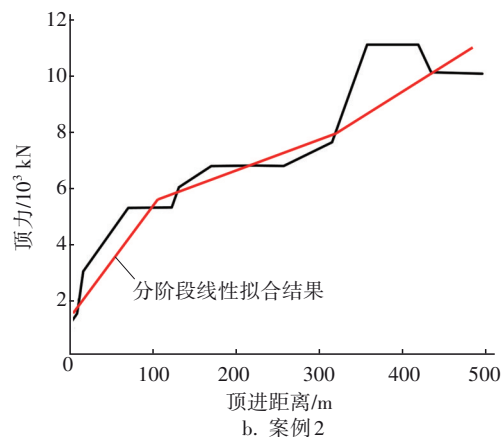
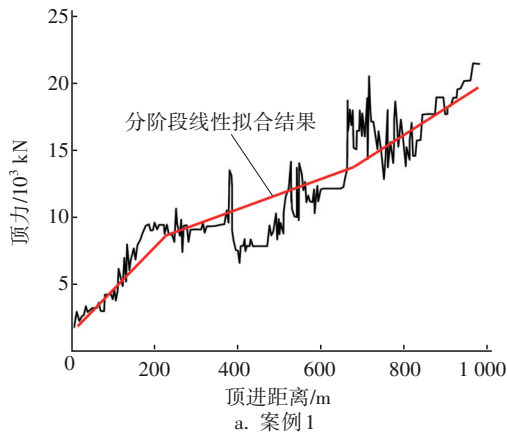


图1 顶管工程案例顶力数据

Fig.1 Jacking force data of pipe jacking projects

从图1可以看出,长距离顶管工程的顶力结果大致可以分为3个阶段,每个阶段内顶力随着顶进距离增加的增长速率各不相同。其中第一阶段增长速率最快,第二阶段增长速率最慢,第三阶段增长速率介于前两个阶段之间。

2.2 对比分析

上述4个经验公式的系数上下限取值见表2。经验公式与工程案例的对比结果如图2所示,其中实线为公式的上限值,虚线为公式的下限值。

表2 不同经验公式的系数取值
Tab.2 Coefficient values in different empirical formulas

项目	经验系数	案例1		案例2	
		上限值	下限值	上限值	下限值
经验公式(1)		12	8	12	8
经验公式(2)	n 或 m	2.0	1.5	4.0	3.0
经验公式(3)	f_k	5.0	3.0	11.0	8.0

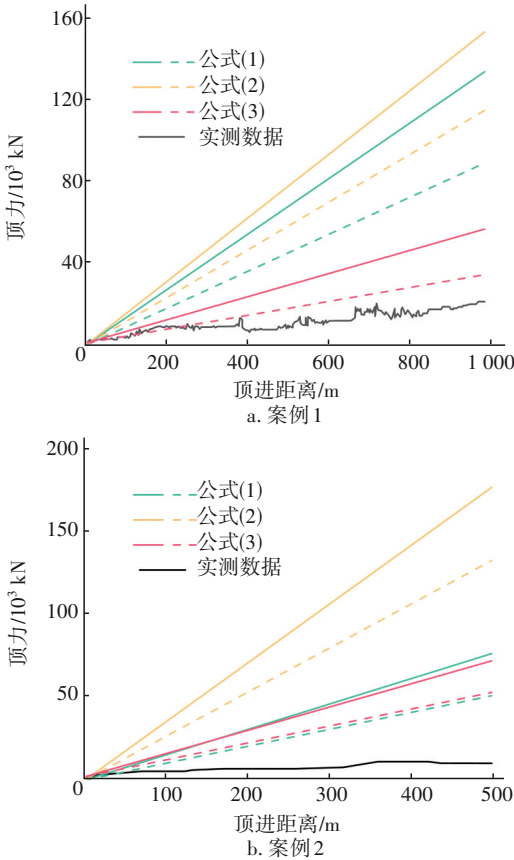


图2 顶管顶力经验公式计算与工程案例实测结果对比
Fig.2 Comparison of jacking force between empirical formula calculation and measured results of project case

从图2可以看出,4个经验公式的计算结果与实测数据偏差非常大,且偏差大小会随着顶进距离的增加而增加。以案例1的公式下限值为例:当顶进距离为300 m时,公式下限值与实测数据之比分别为15.9、20.4、6.0和6.6;当顶进距离增至600 m时,比值增至31.2、40.2、11.7和12.4;当顶进距离增大到984 m时,比值已达到51.1、65.8、19.1和19.8。这表明采用现有系数取值范围计算得到的顶力结果会远大于实测数据。

3 取值范围研究分析

式(4)作为前述三本规范的计算公式,是工程

设计人员使用率最高的公式。

接下来主要对式(4)给出的系数取值范围进行研究分析。根据式(4)可以变换得到管壁单位面积平均摩阻力 f_k 的计算式:

$$f_k = (P - N_F) / \pi DL \quad (5)$$

在案例1和2的基础上,又收集得到案例3^[5]、案例4^[6]和案例5^[7]的平均摩阻力变化,具体如图3所示。

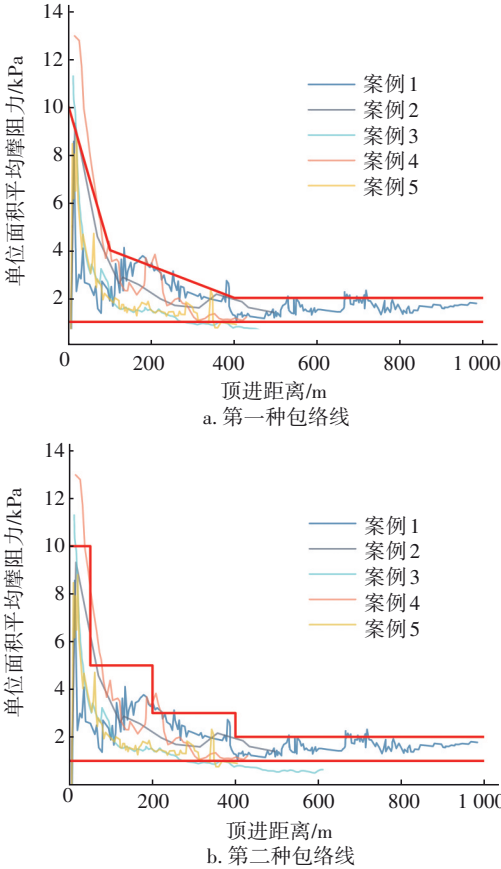


图3 5个案例的单位面积平均摩阻力取值分析
Fig.3 Analysis of average friction value per unit area of five cases

从图3可以看出,平均摩阻力在顶进开始时迅速达到最大值,随后快速下降,接着下降速率逐渐放缓,最后基本保持不变,接近一条直线。这是由于开始顶进时,触变泥浆刚注入管道与土层之间,尚未形成完整的泥浆套筒,此时平均摩阻力为整个过程的最大值;随着管道的顶进,泥浆套筒逐渐形成,在泥浆套筒的减阻作用下,平均摩阻力迅速降低;当顶进距离达到一定长度后,泥浆套筒已经基本稳定,此时平均摩阻力也将基本保持不变。

绘制5组案例数据的第一种包络线,见图3(a),具体表达式为:

$$\text{上限: } f_k = \begin{cases} 10 - 0.06L & 0 \leq L \leq 100 \\ 4.67 - 0.0067L & 100 \leq L \leq 400 \\ 2 & L \geq 400 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{下限: } f_k = 1 \quad (7)$$

式(6)的下限为水平直线,上限分为3段,其中前两段为斜线,第三段是水平直线,在取上限值时需将顶进距离代入公式进行求解。为了进一步方便设计取值,绘制第二种包络线,见图3(b),具体表达式为:

$$\text{上限: } f_k = \begin{cases} 10 & 0 \leq L \leq 50 \\ 5 & 50 \leq L \leq 200 \\ 3 & 200 \leq L \leq 400 \\ 2 & L \geq 400 \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{下限: } f_k = 1 \quad (9)$$

式(8)下限与式(7)完全相同,为水平直线,上限为4条水平直线,可根据顶进距离选取相应的上限值。

4 验证讨论

查阅文献,得到案例6^[8]和案例7^[9],对式(7)和(8)的准确性进行验证分析。利用式(7)和(8)计算得到的顶力结果如图4所示,其中式(7)的上限结果称为上限1,式(8)的上限结果称为上限2。

式(7)和式(8)的计算顶力随顶进距离的增加逐渐增加:式(7)的计算顶力前两段呈曲线形,第三段呈直线形;式(8)的计算顶力在每个阶段均呈直线形,在分段处存在顶力突变。从数值大小来看,2组案例的实测数据几乎全部落在计算区间内:案例6共127个数据,落在区间内的数据比例分别为79.5%和83.5%;案例7共有103个数据,相应比例分别为98.1%和99.0%。

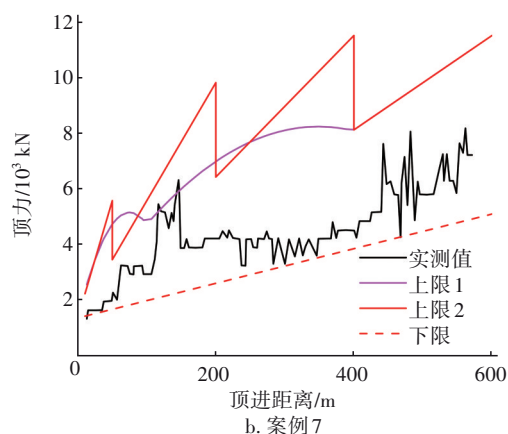
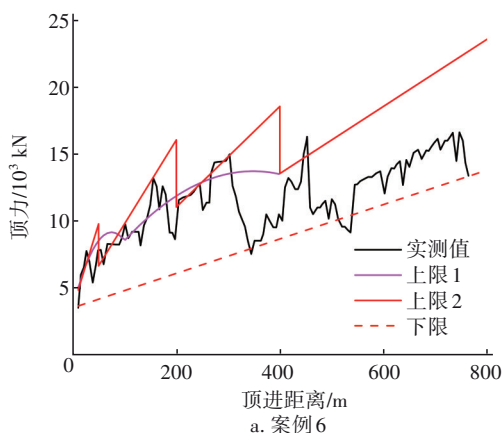


图4 平均摩阻力取值验证

Fig.4 Verification of average friction value

对计算顶力与实测数据的相对误差进行统计分析,结果如图5所示。

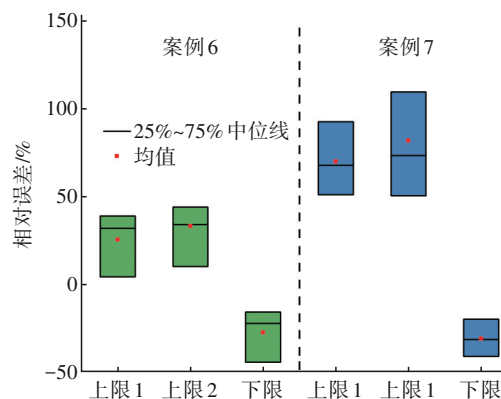


图5 计算顶力与实测数据的相对误差统计结果

Fig.5 Relative error statistical results of calculated jacking force and measured data

从统计数据来看,计算顶力上限值与实测数据的相对误差>0,下限值与实测数据的相对误差<0,再次表明实测数据基本落在计算顶力上下限区间内。从具体数值大小来看:计算下限值与实测值的相对误差基本为20%~40%,计算上限值与案例6的相对误差基本为10%~40%,与案例7的相对误差则为50%~90%。这是由于案例7的实测数据靠近下限值,导致与上限值的相对误差较大。

通过分析可以表明,实测数据基本位于式(7)和式(8)计算得到的顶力上下限区间内,式(7)和式(8)计算得到的顶力上下限区间具有较高的准确度。

5 结论

通过收集工程案例实测数据,分析长距离注浆顶管过程中管壁摩阻力的变化规律,从而优化规范

公式中平均摩阻力的取值范围,得到结论如下:

① 对于顶进距离超过400 m的长距离注浆顶管工程,顶力结果大致可以分为3个增长阶段,其中第一阶段增长速率最快,第二阶段增长速率最慢。现有规范公式计算结果与实测数据偏差非常大,最多可达到60倍。

② 长距离注浆顶管管壁平均摩阻力在顶进开始后迅速增至最大值,随后快速降低,接着降低速率逐渐放缓,最后基本保持不变。

③ 优化后平均摩阻力下限可取1 kPa,上限根据顶进距离的不同选取相应的数值,具体为:0~50 m时取10 kPa;50~200 m时取5 kPa;200~400 m时取3 kPa;大于400 m时取2 kPa。通过优化后平均摩阻力计算得到的顶力上下限区间可以覆盖90%的实测数据,与实测数据的相对误差约为30%。

参考文献:

- [1] 周健民. 顶管顶力计算方法的对比分析与总结研究[J]. 城市道桥与防洪, 2016(5): 214-218.
ZHOU Jianmin. Comparative analysis and summary for calculation method of jacking force [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016 (5): 214-218 (in Chinese).
- [2] 安关峰, 殷坤龙, 唐辉明. 顶管顶力计算公式辨析[J]. 岩土力学, 2002(3): 358-361, 367.
AN Guanfeng, YIN Kunlong, TANG Huiming. Discrimination and analysis of formula for jacking forces in pipe jacking [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002 (3): 358-361, 367 (in Chinese).
- [3] 陈孝湘, 陈勇, 赵剑豪, 等. 海底超长距离大口径混凝土顶管顶力及摩阻力测试分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(3): 136-141.
CHEN Xiaoxiang, CHEN Yong, ZHAO Jianhao, et al. Test and analysis of jacking force and friction resistance of large-diameter concrete pipe-jacking with super-long distance at seabed [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39 (3): 136-141 (in Chinese).
- [4] 杨俊峰, 邓文杰, 余世祥, 等. 富水砂层多孔顶管施工顶力及管节摩阻力监测分析[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(19): 64-68.
YANG Junfeng, DENG Wenjie, YU Shixiang, et al. Monitoring and analysis of jacking force and friction

resistance of porous pipe jacking in water-rich sand layer [J]. Construction Technology, 2021, 50 (19): 64-68 (in Chinese).

- [5] 林国新. 长距离曲线顶管摩阻力实测分析及取值建议[J]. 给水排水, 2018, 44(5): 100-103.
LIN Guoxin. Measured analysis and value recommendations of long-distance curved pipe jacking friction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(5): 100-103 (in Chinese).
- [6] 胡文. 软土地区长距离大断面矩形顶管平行施工影响机理研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022 (9): 177-182.
HU Wen. Study on influence mechanism of long-distance large-section rectangular pipe jacking parallel construction in soft soil area [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022 (9): 177-182 (in Chinese).
- [7] 喻军, 李元海. 顶管泥浆套的物理性质对顶推力的影响[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S2): 327-331.
YU Jun, LI Yuanhai. Effect of physical properties of mud screen of pipe-jacking on jacking forces [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48 (S2): 327-331 (in Chinese).
- [8] 冯锐, 张鹏, 苏树尧, 等. 大口径长距离钢顶管注浆减阻技术: 以黄浦江上游水源地连通管工程为例[J]. 地质科技通报, 2020, 39(4): 174-180.
FENG Rui, ZHANG Peng, SU Shuyao, et al. Resistance reduction by grouting to large diameter and long distance steel pipe jacking: a case study of pipe jacking project in the upstream water source area of Huangpu River [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(4): 174-180 (in Chinese).
- [9] 向安田, 朱合华, 丁文其. 顶管施工中顶力和平均摩阻力与顶程关系分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1005-1009.
XIANG Antian, ZHU Hehua, DING Wenqi. Relationship of jacking force and average friction with jacking path in pipe-jacking construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (4): 1005-1009 (in Chinese).

作者简介: 沈青松(1996-), 男, 浙江浦江人, 博士, 工程师, 主要研究方向为地下水渗流和地下管线施工技术。

E-mail: shen_qs1@hdec.com

收稿日期: 2023-10-12

修回日期: 2023-11-02

(编辑: 衣春敏)