

顶管施工中顶力和平均摩阻力与顶程关系分析

向安田, 朱合华, 丁文其

(同济大学地下建筑工程系, 上海 200092)

摘 要: 顶力是顶管施工中必须确定的一个重要参数, 平均摩阻力则是衡量顶进效果的一个重要指标。为研究二者与顶程的关系, 通过现场实测某长距离大口径急曲线顶管两节管段顶进过程中的顶力以及由顶力计算的平均摩阻力的变化情况, 对顶力和平均摩阻力随顶程变化规律及其影响因素作了深入分析。由于影响因素复杂多变, 顶力全程呈较为剧烈震荡上升的趋势, 平均摩阻力则在经过初期的高位震荡后, 由于施工趋于稳定, 如泥浆套已成型、轴线控制已相对稳定, 以及顶程对影响因素的稀释作用, 而迅速下降并变得比较平稳。只要施工控制措施得力, 长距离大口径急曲线顶管的平均摩阻力完全可以控制在较低的水平上。最后, 本文就施工措施提出了一些建议。

关 键 词: 顶力; 平均摩阻力; 顶程; 影响因素; 震荡; 稀释

中图分类号: U 231⁺.3

文献标识码: A

Relationship of jacking force and average friction with jacking path in pipe-jacking construction

XIANG An-tian, ZHU He-hua, DING Wen-qi

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Jacking force and average friction both are important parameters in pipe-jacking construction, the former can affect construction scheme greatly; the latter can embody whether the construction crafts are good. In the construction of a long distance and large diameter pipe-jacking tunnel with small curvature in Shanghai, jacking forces along jacking path are measured for two pipes. Based on the on-site observation, relationship of jacking force and average friction with jacking path and its influence factors are analyzed. Due to complexity of the influence factors, jacking force increases with violent vibration along jacking path, average friction also vibrates initially at high level. As a result of construction stabilization such as formation of slurry-cover, stabilization of axis-control, and dilution of influence factor along jacking path, average friction decreases quickly and tends to stabilize after initial stage. If construction measures are sound, average friction for long distance pipe-jacking with small curvature can be controlled at a low level. At last, some suggestions about construction are put forward.

Key words: jacking force; average friction; jacking path; influential factor; vibration; dilution

1 前 言

顶力是顶管施工中必须确定的一个重要施工参数, 它直接影响工作井后背设计、管节的强度要求、中继环的配置数量和间距以及顶进设备的选择。目前, 一些文献^[1~3]对顶力的计算给出了各种理论公式, 但由于影响顶力的因素复杂多变, 这些公式很难定量考虑诸如轴向偏差、注浆工艺以及土质变化等因素对顶力的影响, 所以导致各自适用条件并不明确, 计算结果差异较大, 设计计算时往往无所适

从; 很多经验公式虽然简单明了, 但也只能适用于特定的条件, 如某种土质、一定的管径范围、顶进长度等。平均摩阻力是衡量顶进效果的一个重要指标, 它综合反映了施工中泥浆的制备质量、注浆工艺以及轴线控制质量的好坏。要准确计算和预测顶进过程中的顶力和平均摩阻力是比较困难的, 特别是长距离大口径急曲线顶管。因此, 不断从新的顶管工程中总结有关顶力和平均摩阻力随顶程变化规律的新鲜经验, 仍具有不可忽视的现实参考意义。本文就上海某长距离大口径急曲线顶管施工中两节

管段各自实测的顶力和由此计算的平均摩阻力随顶程变化情况做了一些分析,以期对顶力和平均摩阻力与顶程之间的关系有一个认识,总结一些规律,并能为今后同类顶管工程所借鉴。

2 工程概况

工程南起西藏路复兴中路,沿西藏路向北,越过苏州河,延伸至西藏路新疆路,全长约 3.033 km,是目前国内难度最大的长距离、大口径复合曲线顶管。共施作了 8 个工作井,顶进了 7 节管段。由于顶管施工在上海市中心的商业繁华地段进行,并在上海第④层灰色淤泥质黏土地层和第⑤₁₋₂层灰色粉质黏土地层中穿越,所以选用了密封性好、开挖面稳定能力强的掘进设备-泥水平衡顶管机。表 1 是要分析的两段曲线顶管的概况。

表 1 管线顶程设置

Table 1 Configurane of jacking path for the 2 pipes

序号	顶程	管径	长度/m	备注
1	3 [#] ~4 [#]	φ 2 700	576	3 处平面曲线,两处曲线半径 300 m, 另一处曲线半径 600 m,下行落差 2.1 m。
2	5 [#] ~4 [#]	φ 2 700	541	2 处平面曲线,曲线半径 $R = 600$ m。 前 100 m 上行落差 5 m, 后 441 m 下行落差 2.6 m。

2 顶力与顶程关系及其影响因素分析

顶力包括侧摩阻力和机头的迎面阻力,顶程为 0 时的顶力即为初始迎面阻力。理论上讲,应根据顶管埋深的不同以及地层条件的变化,不断修正机头压力(等于迎面阻力),以防止机头压力过大而导致地表过度隆起,或过小而使掘进面失稳,引起地表过大沉降。取顶管平均埋深处机头中心位置静止土压力的 1.00~1.05 倍作为机头压力的设定值,并利用泥水平衡顶管机良好的调节和控制开挖面水土压力的能力使其在顶进过程中维持在恒定状态,有利于加快施工进度。事实证明,在保护环境方面也是可行的。顶进过程中虽然没有将地表沉降完全控制在预先制定的 10 mm 的严格标准内,但最大位移不过 15 mm,顺利穿越了地铁 2 号线,保证了地表建筑和地下管线的安全运营^[4]。所以,每节管段顶进过程中的宏观迎面阻力即为初始迎面阻力,宏观侧摩阻力的波动规律与总顶力的完全一致。为避免波动曲线的相互干扰,图 1,图 2 中仅列出顶力-顶程关系曲线图。

第 1 管节迎面阻力为 1 250 kN,顶力整体呈间歇性剧烈震荡上升趋势,在 120~150 m 段高位震荡(最高达 6 300 kN)后,其后的 150~370 m 段顶

力基本维持在 4 150 kN 下并作平缓低幅震荡,370 m 以后震荡加剧,在顶程为 500 m 时顶力最大,达 8 100 kN。

第 2 管节迎面阻力 1 300 kN,顶力整体呈震荡上升趋势,震荡频率和幅度相对较为均匀,在 68 m 处顶力就跃升到 4 120 kN,在 475 m 处顶力最大,达 6 120 kN。与第 1 管节最大顶力对应的侧摩阻力为 6 850 kN,约是其迎面阻力 1 250 kN 的 6.3 倍;与第 2 管节最大顶力对应的侧摩阻力为 4 920 kN,约是其迎面阻力 1 300 kN 的 4 倍。

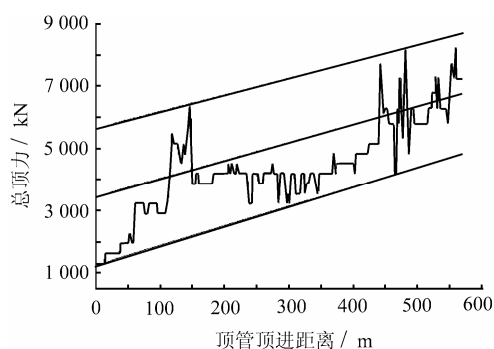


图 1 第 1 节顶管顶力-顶程关系图
Fig.1 Relation of jacking force with jacking path for pipe No.1

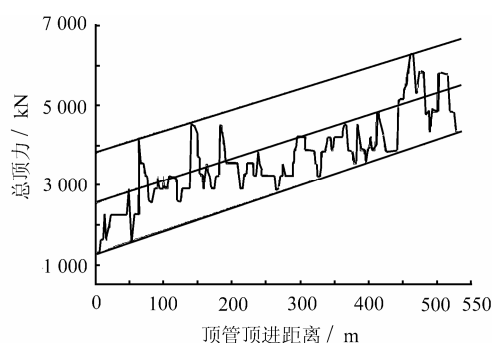


图 2 第 2 节顶管顶力-顶程关系图
Fig.2 Relation of jacking force with jacking path for pipe No.2

两节顶管的顶力在初始阶段都有快速爬升的趋势,由于施工的不断调整,在初始阶段往往震荡比较剧烈,出现顶力的第 1 次峰值。顶力最大值并不是在顶程最大时出现,而是在顶程后段某个阶段出现。由于迎面阻力恒定,所以,侧摩阻力变化是引起长距离急曲线顶管顶力波动的根本原因。通过注浆减摩、轴线控制等手段来降低侧摩阻力和保证其相对稳定,是降低顶力,防止顶力大起大落,保证施工顺利进行的最关键环节。

在迎面阻力基本稳定的情况下,如果其他条件一致,顶力应该随顶程增加而线性增大,这一点已在短距离直线顶管中得到印证^[5]。影响长距离急曲线顶管顶力的因素是多方面的、错综复杂的,再加

上这些影响因素的施工控制难度大,顶力整体上虽呈随顶程增大而增大的趋势,但震荡较为剧烈,震荡幅度较大,频率较高,顶力与顶程的关系比较复杂,很难精确地定量描述(图1,图2)。

归纳起来,影响长距离急曲线顶管顶力的主要因素如下:

(1) 地层条件和地下水。掘进面稳定性随地层变化而变化,地层不同,作用在刀盘或工作仓的土压力也不一样。不同类型地层和同类型管壁之间的摩阻力往往差别很大,粗砂和钢筋混凝土顶管之间的摩擦系数是软土的2~3倍。除了土与管壁之间的摩擦系数对顶力有影响外,土的自支撑能力也是个关键因素。对于无黏性土来说,由于工作面开挖造成孔隙水负压很快地消散,若泥浆套支撑能力不足,上部土层会在开挖之后很快塌落到管道上而增大摩阻力,甚至将顶管抱死。当顶管穿越地层埋深大于临界埋深时,由于“土拱效应”,作用在顶管上的土压力为拱下的土柱重量,反之,作用在顶管上的土压力则为顶管以上全部地层的重量。不同地层产生拱效应的临界深度不一样,黏性地层比非黏性地层的临界深度小很多。

当在地下水位以下地层中施工时,地下水位的变化,必然引起作用于管壁上的正压力的变化而导致管壁侧阻力的变化。地下水还通过作用于掘进面的水压力而影响顶进阻力。

(2) 施工停顿。顶进过程中若停歇时间过长,四周土体可能会坍落在管壁上而影响顶进阻力,同时水分也会从减阻浆液中离析出来,使减阻作用失效,顶进重新启动时顶力会增大。经常性施工停顿后的顶管施工会发生由静摩擦到滑动摩擦的加速转变,这不可避免地会出现所需顶进力的峰值。

(3) 注浆工艺。注浆工艺对顶力的影响主要体现在泥浆的制备质量、泥浆套的完整性和稳定性以及注浆压力上。若泥浆配比不够、泥浆静置时间不足或注浆前搅拌不充分,则泥浆的减阻性能得不到充分发挥,影响减阻效果。顶管密封性不好、地层为非黏性地层或进出洞时未采取有效的封闭措施都容易导致漏浆,若不及时补浆,则形不成完整泥浆套而使顶管推力增大。注浆压力越大,作用在管壁上的压力相应增加,摩阻力也就越大。注浆压力过小,泥浆不能有效扩散到顶管周围形成完整泥浆套,则侧阻力会增大。

(4) 超径比。顶管施工中的超径比是指施工中的超挖量与所顶进管道直径的比值。拉伯运工业大学和太沙基^[6]通过研究顶管超径比对顶进力的影

响,发现当超径比大于最优超径比时,顶进力维持在一个较低的水平,但当超径比不断减小时,顶进力则急剧升高。

(5) 管道状况。顶力随着管径和管长的增大而增大。管道外表面材质的粗糙程度、管接头的平滑与否以及管道润滑涂层的减阻性能等对顶进摩阻力都会产生很大的影响。

(6) 管线方向偏离。管线的偏离往往导致管体和周围土体直接接触,从而会增大侧摩阻力。当管道轴线偏差过大时,在顶进过程还要克服由于扰动土体产生的被动土压力,偏离值越大,扰动范围越大,顶力就越大。

3 平均摩阻力与顶程关系分析

顶管平均摩阻力 f 按下式计算:

$$f = (P - P_a) / \pi DL$$

式中: P 为总顶力; P_a 为迎面阻力; D 为顶管直径; L 为顶进土体中的管长。

由平均摩阻力的计算公式可以看出,在迎面阻力基本稳定的情况下,各影响因素对平均摩阻力和顶力的作用是一致的,但前者所受影响随着顶程增大而被逐渐稀释。下面即为计算数据的相关分析(图3,图4)。

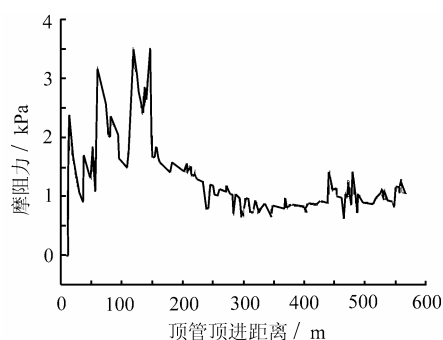


图3 第1节顶管平均摩阻力-顶程关系图
Fig.3 Relation of average friction with jacking path for pipe No.1

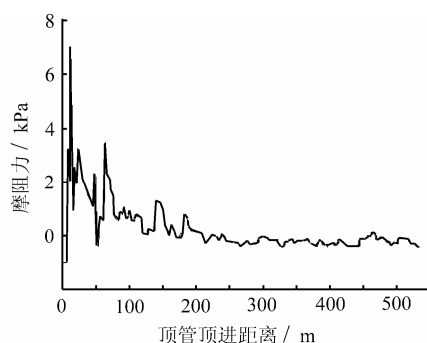


图4 第2节顶管平均摩阻力-顶程关系图
Fig.4 Relation of average friction with jacking path for pipe No.2

第 1 管节初始平均摩阻力 2.4 kPa, 0~175 m 段震荡较为剧烈, 在 150 m 处达最大值 3.5 kPa 后迅速下降至 175 m 处的 1.3 kPa, 175 m 后缓慢下降并趋于平稳, 在 1.0 kPa 附近小幅震荡;

第 2 管节初始平均摩阻力 2.0 kPa, 0~75 m 段震荡较为剧烈, 在 15 m 处即达最大值 8.0 kPa, 在 20 m 处出现 0.4 kPa 的极限低值, 很可能是顶进即将完全停下来的缘故造成的, 75 m 后缓慢下降并趋于平稳, 仅在 1.0 kPa 附近小幅震荡。

图 3, 图 4 中, 平均摩阻力在初始顶入段较大, 最大可达 8~9 kPa, 且震荡剧烈。这是由于顶进初期泥浆套还未成型、轴线控制不太稳定等施工因素造成的。初始顶入段后, 由于施工趋于稳定, 如泥浆套已经成型, 轴线控制已相对稳定, 特别是顶程的稀释作用, 平均摩阻力迅速下降且变得比较平稳, 仅在 1.0 kPa 附近小幅波动, 比以前许多软土顶管的平均摩阻力小很多 (见表 2)。这说明只要在施工中能控制泥浆套的稳定和完整, 保证泥浆的减阻性能, 尽量控制轴线偏差等施工因素, 长距离急曲线顶管的侧摩阻力是可以控制好的。

表 2 典型软土顶管工程管壁平均摩阻力调查汇总表
Table 2 Average friction for typical soft soil pipe-jacking

工程名称	甬江越江通道顶管	宝钢自备电厂取水管道	南市水厂过江源水管	汕头自来水过海管	杨电联网过江管	长江引水二期顶管
土质	泥质粉质黏土	淤泥质粉质黏土	粉质黏土	淤泥质黏土	粉质黏土	淤泥质黏土
平均阻力 / kPa	5.4	3.9	3.0	3.0	4.9	2.4

4 结 语

长距离大口径急曲线顶管顶力整体上呈随顶程增大而增大的趋势, 但震荡较为剧烈, 震荡幅度较大, 频率较高。由于顶进过程中顶力所受影响因素复杂多变, 各种影响因素的影响作用很难量化, 对一些如轴线偏差、注浆工艺以及施工停顿等影响因素的施工控制远不如短距离直线顶管那样容易, 要较为准确地计算和预测顶力随顶程的变化规律仍然比较困难, 现有的理论计算对长距离急曲线顶管顶力的估算甚至都没有参考意义。因此, 要保证长距离大口径急曲线顶管的顺利顶进, 就必须配置留有足够余地的顶进设备, 使液压系统不在满负荷下工作以便形成良性缩环状态。要作好现场施工记录, 根据出现的顶力异常情况进行影响因素分析和施工方案的调整。

平均摩阻力的影响因素和顶力的影响因素是

一致的。随着顶程增加, 顶程对各影响因素的稀释作用增强, 平均摩阻力所受影响则远没有顶力那样显著, 在初始阶段高位震荡后, 迅速下降并趋于平稳。只要严格控制泥浆制备和注浆工艺, 保证泥浆的减阻性能; 控制管接头、中继环、洞口止水装置的密封性能, 合理选择注浆压力和布设注浆孔, 以形成完整稳定的泥浆套; 严格控制轴线偏差以免管壁与土体直接摩擦接触和大范围扰动土体, 长距离急曲线顶管的顶力是可以控制得较小的。这需要不断的总结经验, 改进施工工艺。

参 考 文 献

- [1] 余彬泉, 陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [2] 夏明耀, 曾进伦. 地下工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [3] 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, 23(6): 358—361.
AN Guan-feng, YIN Kun-long, TANG Hui-min. Discrimination and analysis of formulae for jacking forces in pipe-jacking[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(6): 358—361.
- [4] 同济大学隧道及地下工程研究所. 大口径三维急曲线顶管的环境保护与控制技术[R]. 上海: 同济大学隧道及地下工程研究所 2004.
- [5] 何莲, 刘灿生, 帅华国. 顶管施工的顶力设计计算研究[J]. 给水排水, 2001, 27(7): 87—89.
HE Lian, LIU Chan-sheng, SHUAI Hua-guo. Study on design-calculation of pipe-jacking forces[J]. *China Water and Wastewater*, 2001, 27(7): 87—89.
- [6] 马保松, STEIN D, 蒋国盛, 等. 顶管和微型隧道技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [7] 汤华深, 刘叔灼, 莫海鸿. 顶管侧摩阻力理论公式的探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 574—576.
TANG Hua-shen, LIU Shu-zhuo, MO Hai-hong. Discussion on theoretical formulae of lateral friction resistance for pipe jacking[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Supp.2): 574—576.
- [8] 赖冠宙, 房营光. 顶管顶力的理论计算与分析[J]. 广东土木与建筑, 2003(9): 45—47.
LAI Guan-zhou, FANG Ying-guang. Calculation and Analysis of Jacking-forces in Pipe-jacking[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2003 (9): 45—47.
- [9] 魏纲, 魏新江, 徐日庆. 顶管施工引起的挤土效应[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 717—722.

- WEI Gang, WEI Xin-jiang, XU Ri-qing. Study on soil compacting effects induced by pipe jacking construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 717—722.
- [10] 冯海宁, 温晓贵, 魏纲, 等. 顶管施工对土体影响的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 781—785.
- FENG Hai-ning, WEN Xiao-gui, WEI Gang, et al. In-situ test research on influence of pipe jacking on soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 781—785.
- [11] 魏纲, 徐日庆, 邵剑明, 等. 顶管施工中注浆减摩作用机理的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 930—934.
- WEI Gang, XU Ri-qing, SHAO Jian-min, et al. Research on mechanism of reducing friction through injecting slurry in pipe jacking[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 930—934.
- [12] 魏纲, 徐日庆, 余剑英. 顶管施工中管道受力性能的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1 273—1 277
- WEI Gang, XU Ri-qing, YU Jian-ying. Site-based experimental study on pipe behavior during pipe jacking[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1 273—1 277.
- [13] 杨文义. 砂质黏土层中泥水平衡顶管施工顶力分析[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 159—162.
- YANG Wen-yi. Analysis of thrust force by using slurry pipe jacking method in sandy clay soil[J]. **Journal of China Coal Society**, 2006, 31(2): 159—162.
- [14] SOFIANOS A I, LOUKAS P, CHANTZAKOS Ch. Pipe jacking-a sewer under Athens[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2004, 19(2): 193—203.
- [15] MILLIGAN G W E, NORRIS P. Site-based research in pipe jacking-objectives, procedures and a case history[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1996, 11(Supp.1): 3—24.
- [16] KHAZAEI S, SHIMADA H, MATSUI K. Analysis and prediction of thrust in using slurry pipe jacking method[J]. **Abstract Tunnelling and Underground Space Techonlogy**, 19(4—5): 356—356.

上接第 1004 页

- 出版社, 1994.
- [2] VESIC A S. Analysis of ultimate loads on shallow foundations[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1973, 99(1): 45—73.
- [3] 周中, 傅鹤林, 李亮. 圆形浅基础地基承载力的理论解[J]. 长沙铁道学院学报, 2002, 20(3): 1—4.
- ZHOU Zhong, FU He-lin, LI Liang. Theoretical solution of bearing capacity of shallow circular foundation[J]. **Journal of Changsha Railway University**, 2002, 20(3): 1—4.
- [4] 李伟, 熊巨华, 杨敏. 方形浅基础地基承载力的理论解[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2004, 32(10): 1 325—1 327.
- LI Wei, XIONG Ju-hua, YANG Min. Theoretical solution of ultimate bearing capacity of soil under shallow square foundation[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2004, 32(10): 1325—1327.
- [5] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [6] MICHALOWSKI R L. Three-dimensional analysis of locally loaded slopes[J]. **Geotechnique**, 1989, 39(1): 27—38.
- [7] MICHALOWSKI R L. An estimate on the influence of soil weight on bearing capacity using limit analysis[J]. **Geotechnique**, 1997, 37(4): 57—64.
- [8] BUHAN P De, GARNIER D. Three dimensional bearing capacity analysis of a foundation near a slope[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(3): 153—163.
- [9] MICHALOWSKI R L. Upper-bound load estimates on square and rectangular footings[J]. **Geotechnique**, 2001, 51(9): 787—798.
- [10] 王红雨, 杨敏. 临近基坑矩形浅基础地基承载力上限估算[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1 116—1 122.
- WANG Hong-yu, YANG Min. Approximate upper-bound solution for bearing capacity of rectangular footings near excavations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(10): 1 116—1 122.
- [11] 付志前, 王广月, 侯岱云, 等. 矩形基础下加筋砂土地基承载力的研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2003, 33(1): 60—62, 68.
- FU Zhi-qian, WANG Guang-yue, HOU Dai-Yun, et al. Study on bearing capacity of rectangular foundations supported on geogrid-reinforced sand[J]. **Journal of Shandong Univ. (Eng. Sci.)**, 2003, 33(1): 60—62, 68.